



TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOUNDARY LAYER
TURBULEN PADA PELAT DATAR DENGAN ALUR
MELINTANG TIPE-D**

**ARDIANSYAH ARYA MAHENDRA WHINDRACAYA
NRP 2111 100 183**

**Supervisor
Prof. Ir. SUTARDI. M.Eng., PhD.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



FINAL PROJECT - TM141585

**NUMERICAL STUDY OF TURBULENT BOUNDARY LAYER
CHARACTERISTICS OVER FLAT PLATE WITH D-TYPE
TRANSVERSE GROOVES**

**ARDIANSYAH ARYA MAHENDRA W.
NRP 2111 100 183**

**Supervisor
Prof. Ir. SUTARDI. M.Eng., PhD.**

**DEPARTEMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016**



**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOUNDARY
LAYER TURBULEN PADA PELAT DATAR DENGAN
ALUR MELINTANG TIPE-D**

TUGAS AKHIR

Disajikan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Bidang Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh

ARDIANSYAH ARYA MAHENDRA WHINDRACAYA

NRP : 2111100183

Disetujui oleh Pembimbing dan Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD. (Pembimbing)

NIP. 196412281990031002

2. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Penguji 1)

NIP. 197104051997021001

3. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT. (Penguji 2)

NIP. 196202161995121002

4. Dedy Zulhidayat, ST., MT., PhD. (Penguji 3)

NIP. 197512062005021002

Surabaya
2016



STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK BOUNDARY LAYER TURBULEN PADA PELAT DATAR DENGAN ALUR MELINTANG TIPE-D

Nama Mahasiswa : Ardiansyah Arya Mahendra Whindracya
NRP : 2111 100 183
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD.

Abstrak

Boundary layer akan terbentuk apabila aliran viscous melewati suatu kontur permukaan. Hal ini menyebabkan terjadinya gaya drag di kontur permukaan, oleh karena itu boundary layer yang terbentuk perlu dikontrol. Salah satu cara untuk mengontrol boundary layer yang terbentuk adalah dengan memberi alur permukaan yang dilalui aliran. Pada penelitian ini, aliran yang dikaji adalah aliran boundary layer turbulen yang melintasi suatu pelat datar dengan alur melintang tipe-D. Alur tipe-D adalah tipe alur berbentuk persegi dengan kedalaman dan jarak antar alur yang sama, diletakan normal terhadap arah aliran.

Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik. Terdapat 4 model yang disimulasikan yaitu pelat datar (smooth-wall), pelat beralur tipe-D ukuran 4mm, 10mm, dan 30mm. Bilangan Reynolds berdasarkan panjang pelat yaitu $Re_l = 2.16 \times 10^6$ dan kecepatan freestream pada inlet sebesar 10 m/s. Pemodelan numerik dilakukan menggunakan software Gambit 2.4.6 dan Fluent 6.3.26 dengan model 2ddp unsteady, viscous model standart k-epsilon.

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan alur tipe-D berbagai ukuran meningkatkan koefisien drag total dibanding pelat datar (smooth-wall). Pressure-gradient yang terbentuk didalam alur berkontribusi pada peningkatan ini walaupun nilai koefisien skin-friction mengalami penurunan. Tidak hanya koefisien drag total, tapi nilai intensitas turbulensi juga mengalami peningkatan dibanding pelat datar (smooth-wall). Didalam alur juga terbentuk vortex yang berkontribusi dalam penurunan koefisien skin-friction.

Kata kunci : Viscous Drag, Alur Melintang Tipe-D, Skin Friction Coefficient



**NUMERICAL STUDY OF TURBULENT BOUNDARY LAYER
CHARACTERISTICS OVER FLAT PLATE WITH D-TYPE
TRANSVERSE GROOVES**

Name : Ardiansyah Arya Mahendra Whindrachaya
NRP : 2111 100 183
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Supervisor : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., PhD.

Abstract

Boundary layer is formed when viscous fluid flow over a surface. Boundary layer causes the drag force, therefore the boundary layer should be controlled. One of treatment to control boundary layer formation is to modify the flat plate with transverse grooves. This research discusses turbulent boundary layer of flow over a flat plate with d-type transverse grooves. D-type groove is type of groove characterized by square-groove with equal-depth and equal-space within grooves, places normal to flow direction.

The research was conducted using numerical simulation. There are 4 models used for this research, which are flat plate without groove, flat plate with d-type in different sizes, 4mm, 10mm, and 30mm. Reynolds number based on plate length was determined at $Re_l = 2.16 \times 10^6$ and freestream velocity of 10 m/s. The numerical modeling was performed using software gambit 2.4.6 and fluent 6.3.26 model 3ddp unsteady, turbulent viscous standart k-epsilon.

According to this research, modifying the flat plate with various sizes of d-type groove (4mm, 10mm, and 30mm), caused increasing of total drag coefficient compared to flat plate (smooth-wall). Pressure-gradient at the grooves contributed to the increasing of drag force, eventhough skin-friction coefficient along the wall decreasing than flat plate (smooth-wall). Not only total drag coefficient, but also the turbulence intensity has increased compared to flat plate (smooth-wall). Besides of that, a vortex formed inside the groove contributes to skin-friction coefficient reduction.

Keywords : Viscous Drag, D-type Transverse Groove, Skin Friction Coefficient



KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan ijin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Prof. Ir. Sutardi. M.Eng., PhD., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang selalu memberikan saran, motivasi, dan ilmu-ilmu yang sangat bermanfaat bagi penulis. Terima kasih atas kesabarannya selama membimbing penulis.
2. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo. ST. MT., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
3. Bapak Dr. Ir. Heru Mirmanto. MT., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak Dedy Zulhidayat., ST., MT., PhD., selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
5. Kedua orang tua yaitu Ir. Hendro Soesanto, MM. dan Windaryati Nur Endah, yang telah membanting tulang, menasihati, dan mendoakan demi kelancaran kuliah dan tugas akhir penulis. Terima kasih sudah menjadi orang tua terbaik di dunia.
6. Saudara-saudara kandung penulis, yaitu kakanda Aditya Achmad Narendra Whindracya dan adinda Annisa Ayu Nindya Whindracya yang selalu menjadi motivasi penulis.
7. Ines Adhiaksono Putri yang selalu membuat berjuang untuk menyelesaikan kuliah terasa lebih ringan.
8. Teman-teman sekontrakan 25VW Alvin, Isat, Pasca, Wily, Aldi, Aldo, Fajar, Verdy terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
9. Seluruh Dosen dan Karyawan jurusan Teknik Mesin ITS,
10. Seluruh civitas akademik Teknik Mesin ITS.



11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

**DAFTAR ISI**

HALAMAN JUDUL	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>Boundary Layer</i>	4
2.2 Koefisien <i>Skin-friction</i> , Koefisien Tekanan dan Koefisien <i>Drag</i>	8
2.2.1 Koefisien <i>Skin-friction</i>	8
2.2.2 Koefisien Tekanan	8
2.2.3 Koefisien <i>Drag</i>	9
2.3 Turbulensi	10
2.3.1 Intensitas Turbulensi	11
2.4 Karakteristik <i>Boundary Layer</i> pada Permukaan Kasar	12
BAB III METODE PENELITIAN	15
3.1 Langkah-Langkah Penelitian	15
3.1.1 <i>Pre-processing</i>	15
3.1.2 <i>Processing</i>	18
3.1.3 <i>Post-processing</i>	21



3.2 Flowchart	21
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Profil Kecepatan.....	23
4.2 Intensitas Turbulensi	25
4.3 Distribusi Koefisien <i>Skin-friction</i>	25
4.4 Distribusi Koefisien Tekanan.....	28
4.4.1 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Datar (<i>smooth-wall</i>)	28
4.4.2 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 30mm.	30
4.4.3 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 10mm.	31
4.4.4 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 4mm...	33
4.5 Koefisien Drag Total.....	34
4.6 Visualisasi	36
4.6.1 Visualisasi Kontur dan Vektor Kecepatan	36
4.6.2 Visualisasi <i>Inflow-Ejection</i> pada alur	38
BAB V PENUTUP	40
5.1 Kesimpulan	40
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN.....	42



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	<i>Boundary layer laminar</i> dan turbulen sepanjang pelat datar	4
Gambar 2.2	Perbandingan profil kecepatan <i>boundary layer laminar</i> dan turbulen.....	5
Gambar 2.3	Ketebalan <i>boundary layer</i>	7
Gambar 2.4	Plot semilogaritmik dari profil kecepatan <i>boundary layer</i> turbulen	7
Gambar 2.5	Profil <i>drag</i>	9
Gambar 2.6	Grafik C_f fungsi x/d penelitian Choi dan Fujisawa (1993)	12
Gambar 2.7	Grafik distribusi wall shear stress pada downstream sebuah alur (Pearson <i>et al.</i> 1997)	13
Gambar 3.1	Geometri benda uji.....	16
Gambar 3.2	<i>Domain</i> simulasi.....	17
Gambar 3.3	<i>Meshing</i> pelat datar dengan alur 30mm.	18
Gambar 3.4	<i>Flowchart</i>	22
Gambar 4.1	Profil kecepatan pelat datar (<i>smooth-wall</i>) dan pelat beralur melintang tipe-D 4mm, 10mm, 30mm.....	24
Gambar 4.2	Intensitas turbulensi pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>) dan pelat beralur 4mm, 10mm, 30mm saat $x = 1\text{ m}$	26
Gambar 4.3	Plot logaritmik intensitas turbulensi pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>) dan pelat beralur 4mm, 10mm, 30mm saat $x = 1\text{ m}$	26
Gambar 4.4	Distribusi koefisien gesek (C_f) pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>) dan pelat beralur tipe-D ukuran 30mm saat $x = 0\text{ m}$ hingga $x = 1\text{ m}$	27
Gambar 4.5	Distribusi koefisien tekanan pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>) sepanjang <i>domain wall</i>	29
Gambar 4.6	Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 30mm sepanjang <i>domain wall</i>	30



Gambar 4.7 Distribusi koefisien tekanan pada alur pertama pelat beralur tipe-D ukuran 30mm.....	31
Gambar 4.8 Distribusi koefisien tekanan pada alur pertama pada pelat beralur tipe-D ukuran 10mm.....	32
Gambar 4.9 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 10mm saat dua alur pertama.	32
Gambar 4.10 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 4mm sepanjang <i>domain wall</i>	33
Gambar 4.11 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 4mm saat dua alur pertama	34
Gambar 4.12 Visualisasi kontur kecepatan pelat beralur tipe-D ukuran 30mm, 10mm, 4mm saat alur pertama.....	37
Gambar 4.13 Proses terjadinya <i>ejection-inflow</i> fluida pada alur pertama pelat beralur 30mm.....	38

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Rangkuman tahap <i>processing</i>	20
Tabel 4.1 Shape factor pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>), pelat beralur tipe-D 4mm, 10mm, 30mm	25
Tabel 4.2 Nilai C_f saat $x = 0.996m$ pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>), pelat beralur tipe-D 4mm, 10mm, 30mm.....	28
Tabel 4.3 Koefisien <i>drag</i> C_d pada pelat datar (<i>smooth-wall</i>), pelat beralur dengan variasi ukuran alur	35



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketika sebuah fluida mengalir pada permukaan, gesekan dengan permukaan menyebabkan aliran dekat permukaan mengalami deselerasi. Daerah yang dinamakan *boundary layer* adalah daerah dimulai dari aliran yang menempel langsung dengan permukaan dan berakhir pada titik dimana kecepatan aliran mendekati kecepatan *freestream*. Penelitian mengenai *boundary layer* pada umumnya diarahkan untuk dapat mengurangi efek negatif yang ditimbulkan oleh aliran fluida, seperti gaya gesek dan gaya *drag*. Modifikasi pada *boundary layer* akan memungkinkan untuk mengurangi hambatan pada aliran dekat permukaan, hambatan ini menghasilkan gaya *drag*. *Drag* akan berhubungan dengan adanya kekasaran permukaan yang sangat berpengaruh terhadap efisiensi sebuah sistem.

Drag akibat gesekan permukaan memiliki peran sangat penting pada efisiensi keseluruhan mulai dari pesawat terbang, kapal, maupun mobil berkecepatan tinggi seperti F1. Menurut **Coustol dan Savill** (1991), gaya *drag* akibat gesekan permukaan menyumbang hingga 50% dari gaya *drag* total pada sebuah pesawat terbang penumpang saat terbang. Investigasi mengenai pengurangan gaya *drag* akibat gesekan permukaan telah banyak dilakukan beberapa dekade terakhir, karena berpotensi meningkatkan efisiensi keseluruhan sebuah sistem.

Penelitian mengenai karakteristik *boundary layer* turbulen yang melewati alur melintang telah banyak dilakukan (**Choi dan Fujisawa**, 1993 ; **Djenidi et al.**, 1994 ; **Wahidi et al.**, 2005 ; **Alhinai**, 2015). Walau demikian, tingkat interaksi antara aliran didalam alur dengan lapisan geser diatas alur belum diketahui secara jelas. Adanya aliran didalam alur dipercaya mengakibatkan meningkatnya pertukaran momentum antara alur dengan lapisan geser diatas alur.

Alur melintang tipe-D adalah alur yang memiliki ciri alur dengan jarak yang sama, tegak lurus arah aliran, dan memiliki dimensi yang sama antara kedalaman alur dan lebar alur. **Coustol dan Savill** (1991) melaporkan penurunan gaya *drag* total sebesar 2-3% pada alur melintang tipe-D apabila tiap alur diberi jarak 20 kali



lebar alur. **Choi dan Fujisawa** (1993) melakukan eksperimen mengenai kemungkinan pengurangan gaya *drag* pada permukaan dengan alur melintang tipe-D. Hasil eksperimen berupa koefisien tekanan dan koefisien gesek, mengindikasikan penurunan *drag* total sebesar 1%. Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian lebih lanjut tentang efek penambahan alur tipe-D pada sebuah pelat datar diperlukan agar dapat diketahui kemungkinan pengurangan gaya *drag* total.

1.2 Rumusan Masalah

Akibat dari efek viskositas fluida, aliran yang melewati suatu permukaan akan terbentuk *boundary layer*. Pada penelitian **Choi et al.** (1989), melalui studi *flow visualization* ditemukan bahwa pemberian alur melintang menyebabkan terbentuknya *stable vortex* dari fluida yang berada didalam alur. Pemberian alur ternyata juga menghasilkan gaya *drag* yang disebabkan perbedaan tekanan yang terjadi didalam alur, meskipun dapat menurunkan *shear stress*. Sehingga secara umum hasil dari penelitian-penelitian sebelumnya masih didapatkan gaya *drag* secara keseluruhan yang masih besar apabila dibandingkan dengan gaya *drag* yang terjadi pada permukaan tanpa alur.

Choi dan Fujisawa (1993) mengkaji efek dari alur persegi melintang pada sebuah plat datar dan ternyata ditemukan reduksi *skin-friction drag* sejumlah 1% dengan mengabaikan *pressure drag*. **Elvarasan et al.** (1996) menemukan bertambahnya *drag* akibat gesekan sekitar 3-4% pada plat datar dengan perbandingan jarak lebar alur dan jarak antar alur sebesar 20. **Sutardi dan Ching** (1999) menemukan adanya peningkatan koefisien gesekan dan intensitas turbulensi dekat dinding sesaat downstream alur, dan peningkatan nilai koefisien gesekan dan intensitas turbulensi berkurang seiring peningkatan ukuran alur.

Penelitian lebih lanjut mengenai efek alur melintang tipe-D pada karakteristik *boundary layer* turbulen dibutuhkan untuk mengkaji lebih dalam, dengan alasan berikut :

- a) Hasil beberapa penelitian terdahulu menunjukan hasil yang kontradiktif baik gaya *drag* total, koefisien gesek, maupun intensitas turbulensi.



- b) Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen, dimana terdapat keterbatasan untuk mengetahui lebih detail mengenai karakteristik *boundary layer* turbulen seperti kontur tekanan, vektor kecepatan, dan struktur *streamline* dan kemungkinan terjadinya *error* saat pengambilan data.
- c) Walaupun beberapa penelitian telah dilakukan dengan metode numerik, namun simulasi yang dilakukan dengan asumsi aliran *steady*. Simulasi numerik pada penelitian kali ini akan dilakukan dengan kondisi *unsteady*, agar didapatkan hasil dan visualisasi aliran yang lebih akurat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik *boundary layer* turbulen secara detail yang melintasi pelat datar yang diberi alur melintang tipe-D dan perbedaannya dengan tanpa alur (*smooth-wall*). Besaran yang dikaji adalah sebagai berikut :

1. Profil kecepatan
2. Intensitas turbulensi
3. Distribusi koefisien *skin-friction*
4. Distribusi koefisien tekanan
5. Koefisien *drag* total
6. Visualisasi vektor kecepatan
7. Visualisasi *inflow-ejection* fluida pada alur

1.4 Batasan Masalah

1. Pada penelitian ini diperlukan batasan masalah agar pembahasan yang dilakukan sesuai tujuan yang telah ditentukan, antara lain:
2. Fluida kerja yang digunakan adalah udara dengan kondisi aliran bersifat *incompressible*, *viscous* dan *uniform* di sisi inlet.
3. Aliran yang diamati adalah kasus *boundary layer* turbulen.
4. Kemungkinan terjadinya perpindahan panas diabaikan.

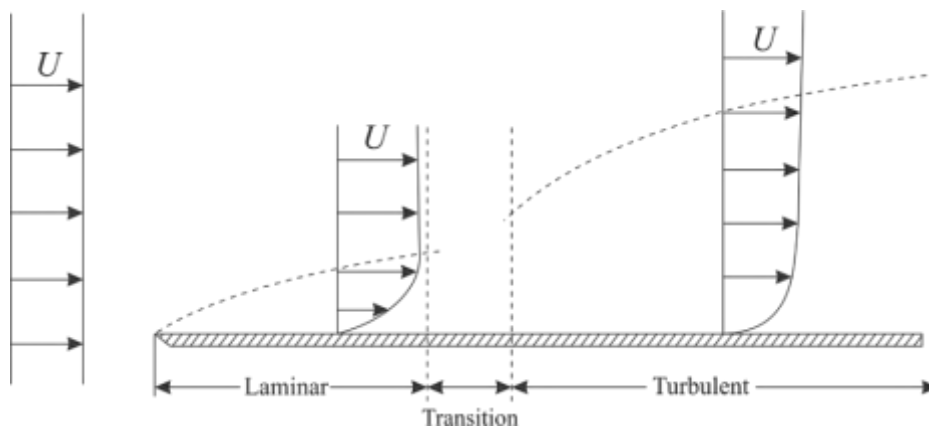
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini berisi tentang teori dasar yang melandasi penelitian yang dilakukan tentang penambahan alur melintang tipe-D pada pelat datar terhadap perubahan karakteristik *boundary layer* turbulen yang terbentuk.

2.1 *Boundary Layer*

Berdasarkan besarnya harga bilangan *Reynolds*, *boundary layer* dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu *boundary layer laminar* dan *boundary layer turbulen*. Diantara dua jenis *boundary layer* tersebut terdapat daerah yang disebut daerah transisi. Diantara faktor yang mempengaruhi proses transisi yaitu gradien tekanan, kekasaran permukaan, gaya bodi, dan gangguan aliran bebas. Proses terbentuknya *boundary layer* diatas sebuah pelat datar terdapat pada gambar 2.1.

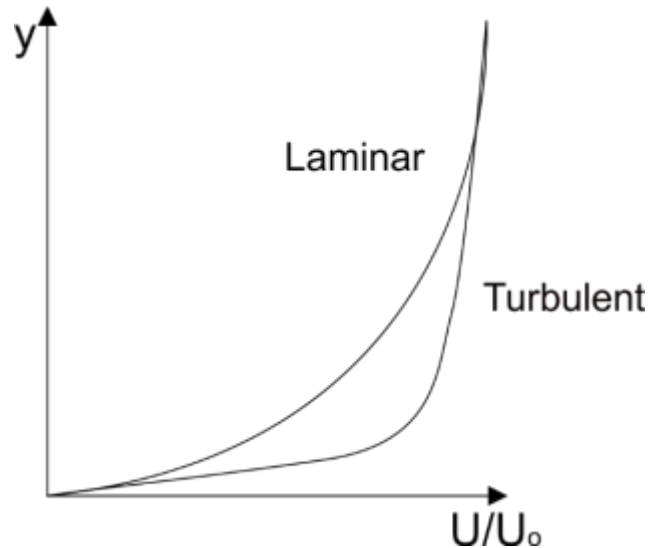


Gambar 2.1 *Boundary layer laminar* dan turbulen sepanjang pelat datar.

(Fox and McDonald, 1998)

Hambatan pada aliran fluida terjadi akibat tegangan geser, sehingga terbentuklah *boundary layer*. Saat *boundary layer* yang terbentuk memiliki ketebelan yang tipis dan aliran fluida bergerak secara berlapis-lapis, kondisi ini dikenal dengan *boundary layer laminar*. Selanjutnya, *boundary layer* berkembang memasuki daerah transisi. Semakin jauh aliran dari ujung pelat maka kondisi aliran fluida akan semakin tidak stabil dan banyak terjadi olakan yang akan semakin kuat,

sehingga terjadi pertukaran energi antar partikel fluida yang semakin kuat pula. *Boundary layer* yang terbentuk saat hal itu terjadi disebut *boundary layer* turbulen. Perbandingan profil kecepatan antara *boundary layer laminar* dan turbulen terdapat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perbandingan profil kecepatan *boundary layer laminar* dan turbulen.

Karakteristik *boundary layer* yang terbentuk dapat dinyatakan secara kuantitatif sebagai berikut :

a) *Disturbance Thickness (δ)*

Ketebalan lapisan batas (*disturbance thickness*) atau sering disebut *boundary layer thickness* adalah jarak normal yang diukur dari permukaan benda padat hingga suatu titik dimana kecepatan aliran fluida adalah 0.99 kali kecepatan *freestream*. Ketebalan lapisan batas sukar untuk diukur dengan pasti karena profil kecepatan berkembang secara halus dan asimtotik terhadap *freestream*. *Boundary layer thickness* fungsi bilangan *Reynolds* sebuah aliran turbulen pada sebuah *zero-pressure gradient* pelat datar (*smooth-wall*) dapat diestimasi dengan rumus berikut :

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.382}{Re_x^{1/5}} \quad (5 \times 10^5 < Re_x < 10^7) \quad (2.1)$$

(Fox and McDonald, 1998)

b) *Displacement Thickness* (δ^*)

Displacement thickness adalah jarak dimana batas permukaan harus dipindahkan secara imajiner dalam aliran tanpa gesekan sehingga memberikan laju alir massa yang setara dengan penurunan laju alir massa yang terjadi akibat adanya lapisan batas dan dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy, \quad (2.2)$$

dimana : u = mean velocity in x -direction (m/s)

U_{∞} = freestream velocity (m/s)

c) *Momentum Thickness* (θ)

Momentum thickness didefinisikan sebagai ketebalan dari suatu lapisan fluida dengan kecepatan *freestream* dimana fluks momentumnya sama dengan pengurangan fluks momentum melalui lapis batas dan dinyatakan dengan persamaan berikut:

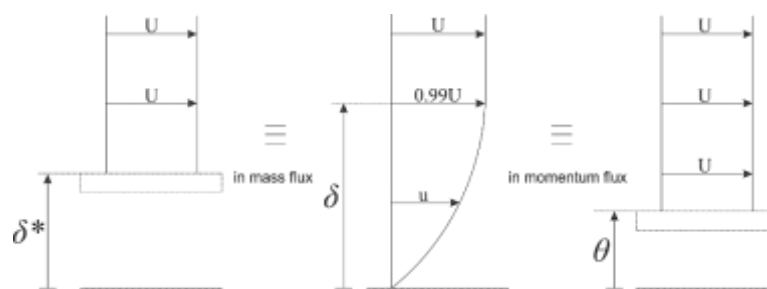
$$\theta = \int_0^{\delta} \frac{u}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy \quad (2.3)$$

d) *Shape Factor* (H)

Shape factor secara sederhana adalah perbandingan antara *displacement thickness* dan *momentum thickness*, dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$H = \delta^* / \theta \quad (2.4)$$

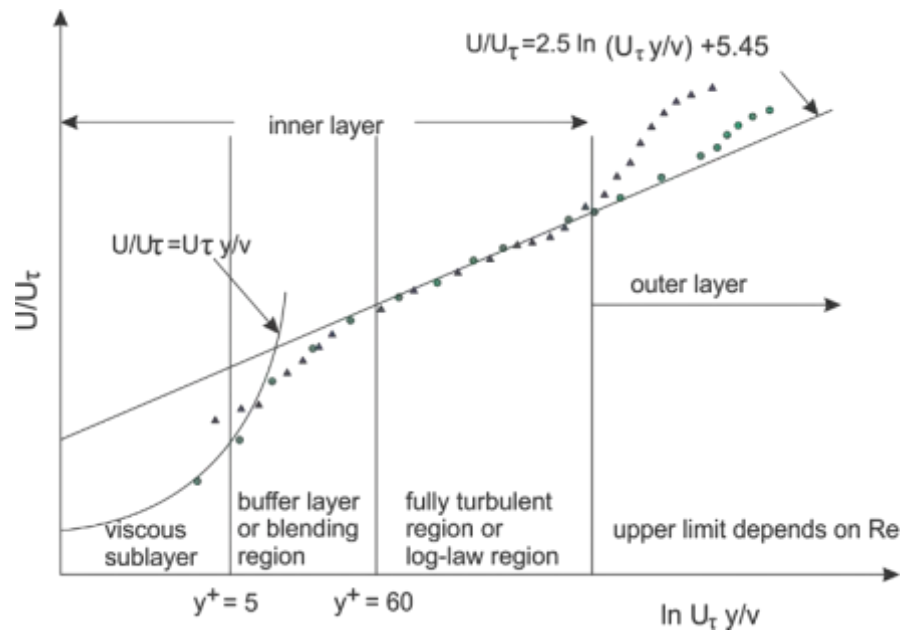
Definisi *disturbance thickness*, *displacement thickness*, dan *momentum thickness* digambarkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ketebalan *boundary layer* (Fox dan McDonald, 1998)

e) Profil Kecepatan *Boundary Layer* Turbulen

Apabila sumbu absis diubah menjadi sumbu ordinat dan juga sebaliknya pada gambar 2.2, maka profil kecepatan aliran turbulen tergambar pada gambar 2.4 dalam fungsi *non-dimensional* y^+ dan U/U_τ .



Gambar 2.4 Plot semilogaritmik dari profil kecepatan *boundary layer* turbulen

Namun, profil ini lebih kompleks secara matematis daripada persamaan integral momentum. Oleh karena persamaan integral momentum adalah persamaan perkiraan/estimasi, maka profil kecepatan untuk *boundary layer* turbulen pada pelat datar yang dapat digunakan yaitu persamaan empiris profil *power-law* pangkat $\frac{1}{7}$ sebagai berikut :

$$\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}} \quad (2.5)$$



2.2 Koefisien *Skin Friction*, Koefisien Tekanan dan Koefisien *Drag*

2.2.1 Koefisien *Skin Friction*

Besaran non-dimensional yang menyatakan proporsionalitas tegangan geser atau gaya *friction* per satuan area adalah koefisien *skin friction*. Besar tegangan *shear* pada sebuah pelat datar dengan *boundary layer* turbulen dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\tau_w = 0.0233\rho U^2 \left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4} \quad (2.6)$$

Sedangkan koefisien *skin friction* fungsi bilangan *Reynolds* dapat dirumuskan dengan :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 0.466\left(\frac{v}{U\delta}\right)^{1/4} = \frac{0.0594}{Re_x^{1/5}} \quad (2.7)$$

(Fox and McDonald, 1998)

Persamaan 2.7 berlaku untuk bilangan *Reynolds* $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$.

2.2.2 Koefisien Tekanan

Distribusi tekanan yang terjadi pada kontur benda bisa dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi yang disebut koefisien tekanan. Koefisien tekanan (C_p) adalah selisih antara tekanan statis lokal dan tekanan statis *freestream* dibagi dengan tekanan dinamis.

$$C_p = \frac{p_c - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (2.8)$$

dimana:

C_p : koefisien tekanan

p_c : tekanan statis lokal pada kontur

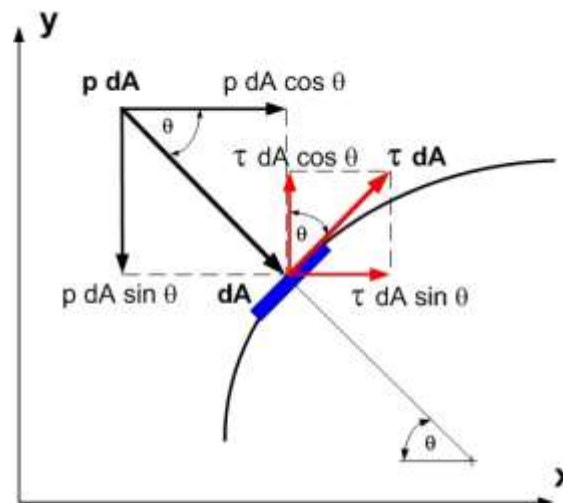
p_∞ : tekanan statis *freestream*

ρ : massa jenis fluida

U_∞ : kecepatan *freestream*

2.2.3 Koefisien Drag

Benda yang terbenam di dalam aliran fluida yang bergerak akan mengalami gaya-gaya akibat interaksi dengan fluida. Gaya yang ditimbulkan ini dapat berupa *normal force* (gaya normal) akibat dari tekanan fluida dan *shear force* (gaya geser) yang disebabkan oleh viskositas fluida. Pada aliran dua dimensi, gaya-gaya yang sejajar dengan aliran fluida disebut *drag force* (gaya hambat) sedangkan gaya-gaya yang tegak lurus dengan arah aliran dinamakan *lift force* (gaya angkat). Gaya hambat yang terjadi dapat berupa *skin friction drag* (F_{Df}) yaitu gaya hambat yang menyinggung permukaan secara tangensial yang timbul sebagai akibat adanya viskositas (tegangan geser antara fluida dan permukaan benda) dan *pressure drag* (F_{Dp}) yaitu gaya hambat yang tegak lurus terhadap permukaan benda yang timbul karena adanya tekanan fluida. Resultan antara *skin friction drag* dengan *pressure drag* ini disebut *profile drag* (gaya hambat total) yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Profile drag

Resultan dari gaya akan menghasilkan komponen gaya-gaya sebagai berikut:

$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau dA)\sin\theta \quad (2.9)$$

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau dA)\cos\theta \quad (2.10)$$

komponen gaya ke arah sumbu- x adalah gaya hambat sedangkan komponen gaya ke arah sumbu- y adalah gaya *lift*. Gaya hambat yang terbentuk dapat didefinisikan sebagai berikut:



$$F_D = F_{Df} + F_{Dp} \quad (2.11)$$

$$F_D = \int \cos\theta(p dA) + \int \sin\theta(\tau dA) \quad (2.12)$$

Biasanya gaya *drag* sering diekspresikan dalam bilangan tak berdimensi yaitu koefisien *drag* yang didefinisikan sebagai total tegangan akibat gaya *drag* dibagi dengan tekanan dinamis *freestream* ($1/2\rho U_\infty^2$) atau:

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho U_\infty^2 A} \quad (2.13)$$

Koefisien *drag* (C_D) juga dapat diperoleh dengan hasil integrasi dari distribusi tekanan (C_p) sepanjang kontur *solid body* yang merupakan kontribusi dari *normal pressure* atau *pressure drag*. Adapun koefisien *drag* (C_D) diperoleh dengan mengintegrasikan distribusi tekanan sepanjang kontur dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_D = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (2.14)$$

Pada aliran turbulen pada sebuah pelat datar (*smooth-wall*) nilai C_D fungsi Bilangan *Reynolds* (*valid* untuk $5 \times 10^5 < Re_l < 10^7$) dapat diestimasi dengan rumus sebagai berikut :

$$C_D = \frac{0.0742}{Re_l^{1/5}} \quad (2.15)$$

2.3 Turbulensi

Turbulensi merupakan fluktuasi tak beraturan pada aliran fluida didalam medan aliran atau tingginya fluktuasi dari *vorticity*. Turbulensi muncul dalam waktu sesaat di dalam ruangan dan terjadi pencampuran properti fluida sebagai akibat dari gradien tekanan. Gradien tekanan ini terjadi di dalam ruangan atau dipengaruhi faktor lingkungan. Lingkungan-lingkungan aliran biasanya merupakan batas aliran, misal permukaan datar (pelat datar), sudut tajam, atau benda menghalangi aliran (*bluff body*) yang mana permukaan tersebut menghasilkan gradien tekanan sebagai akibat viskositas fluida. Turbulensi juga menyebabkan naiknya transpor massa dan momentum yang melawan *shear layer* pada permukaan objek. Hal ini juga akan mempengaruhi *skin friction*, tekanan, dan *vortex shedding*.



2.3.1 Intensitas Turbulensi

Turbulensi dapat dikatakan sebagai sebuah fluktuasi yang terjadi pada aliran udara. Aliran *steady* akan memiliki turbulensi yang rendah begitupula sebaliknya aliran *unsteady* akan memiliki turbulensi yang lebih tinggi. Intensitas turbulensi adalah skala pengukuran untuk mengetahui rendah atau tingginya turbulensi. Sebuah aliran udara ideal dengan tanpa fluktuasi pada kecepatan dan arah aliran akan memiliki nilai intensitas turbulensi 0%. Intensitas turbulensi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I = \frac{u_{rms}}{U_{avg}} \quad (2.16)$$

dimana :

u_{rms} = *root-mean-square* dari fluktuasi kecepatan atau standar deviasi dari fluktuasi kecepatan turbulen

U_{avg} = kecepatan rata-rata *freestream*

Apabila energi turbulen k , maka u_{rms} dapat dihitung dengan

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (2.17)$$

dan U_{avg} dapat dihitung dari kecepatan rata-rata tiga komponennya sebagai :

$$U_{avg} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (2.18)$$

dimana :

u'_x = fluktuasi kecepatan aliran pada komponen x

u'_y = fluktuasi kecepatan aliran pada komponen y

u'_z = fluktuasi kecepatan aliran pada komponen z

U_x = Kecepatan *freestream* pada komponen x

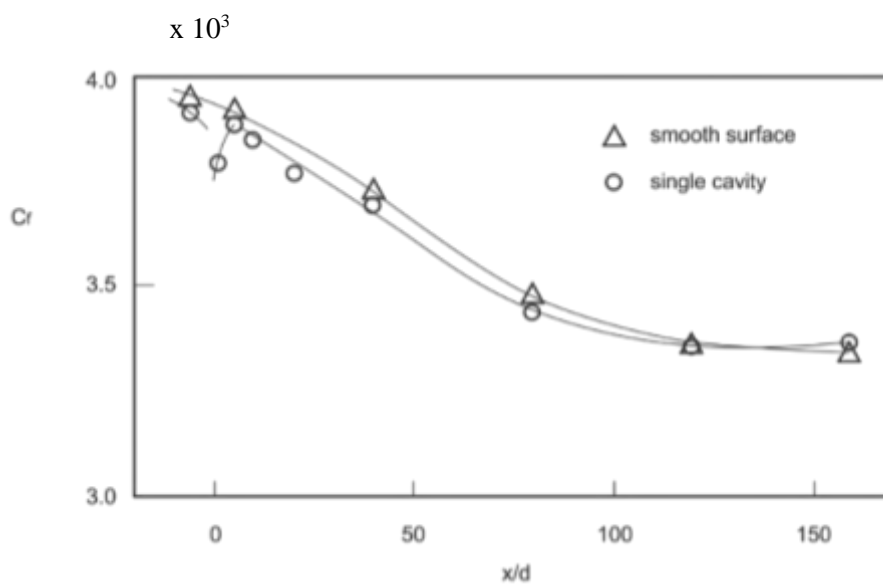
U_y = Kecepatan *freestream* pada komponen y

U_z = Kecepatan *freestream* pada komponen z

Berdasarkan perhitungan, nilai intensitas turbulensi diatas 100% mungkin terjadi saat kecepatan rata-rata udara rendah dan fluktuasi kecepatan yang terjadi sangat besar.

2.4 Karakteristik *Boundary Layer* pada Permukaan Kasar

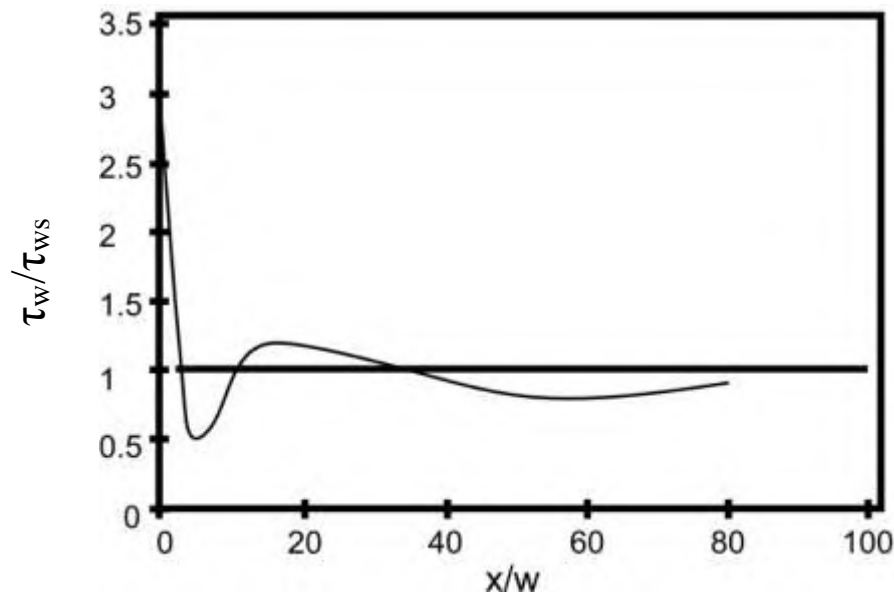
Choi dan Fujisawa (1993) melakukan studi menggunakan pelat datar dengan alur bujur sangkar yang melintang arah aliran fluida di dalam *wind tunnel* berkecepatan rendah, $Re_x = 0,6 \times 10^6$, dengan *static pressure tap* sebanyak 42 tap dipasang pada permukaan *upstream* dan *downstream* alur. Geometri alur untuk eksperimen adalah kedalaman 10 mm dan lebar 10 mm yang diletakan pada 1.15 m dari *leading edge* pelat datar. Hasil yang didapat didapatkan total penurunan *skin friction* sebesar 1%. Jadi pengaruh terhadap penurunan *drag* kecil sehingga dapat diabaikan. Gambar 2.6 merupakan grafik hasil penelitian **Choi dan Fujisawa** (1993) dimana terlihat nilai koefisien gesek setelah diberi alur tunggal mengalami penurunan dibanding pelat datar tanpa alur (*smooth wall*).



Gambar 2.6 C_f fungsi x/d penelitian **Choi dan Fujisawa** (1993)

Pearson et al (1997) melakukan penelitian dengan alur bujur sangkar yang memiliki lebar dan kedalaman 5 mm. Pengukuran kecepatan dengan LDV (*Laser Doppler Velocimeter*). Hasil eksperimen yang diperoleh adalah pada *boundary layer laminar* dengan $Re_\theta = 110$, menunjukan bahwa harga perbandingan

grafik C_f/C_{f0} terhadap x/δ_0 mengalami peningkatan maksimum sebesar 1.2 pada *leading edge* dan *trailing edge* sebesar 2.2. **Pearson et al** menunjukkan bahwa terjadi kenaikan tajam C_f/C_{f0} tepat pada downstream alur. Gambar 2.7 menunjukkan distribusi τ_w/τ_{ws} hasil eksperimen **Pearson et al.** (1997) pada *downstream* dari sebuah *single transverse square groove*.



Gambar 2.7 Grafik distribusi *wall shear stress* pada *downstream* sebuah alur tunggal (Pearson et al. 1997)

Sutardi (2003) melakukan investigasi efek dari 3 macam ukuran alur melintang yaitu 5 mm, 10 mm, dan 20 mm terhadap *boundary layer* turbulen dengan dua *Reynolds number* berdasarkan *momentum thickness* 1000 dan 3000. Ditemukan bahwa terjadi peningkatan *mean velocity*, *streamwise velocity*, intensitas turbulensi *wall-normal* sesaat *downstream* dari alur dibanding *smooth wall*, dan peningkatan semakin besar seiring dengan peningkatan ukuran alur.

Penelitian **Wahidi et al** (2005) dilakukan menggunakan benda uji dengan panjang 1.9 m dengan luas penampang 457 x 457 mm² disebuah *wind tunnel* dengan kecepatan maksimal *freestream* 33 m/s. Benda uji terletak 600 mm dari awal terbentuknya benda uji. Terdapat 4 benda uji yaitu satu alur bujur sangkar, tiga bujur sangkar dengan perbandingan lebar alur dan jarak antar alur $s/w = 20$, tiga alur ujur sangkar dengan $s/w = 40$ dan empat alur bujur sangkar dengan $s/w = 20$.



Masing-masing memiliki kedalaman dan lebar alur 5 mm. Dengan $Re_\theta = 4580$, hasil eksperimen yang didapat menunjukkan peningkatan C_f maksimum benda uji 1 sebesar 5.27 %, benda uji 2 ($s/w = 20$) meningkat 5.15%, dan peningkatan minimum pada benda uji 3 ($s/w = 40$) sebesar 2.38 %.

Aliran fluida yang melewati sebuah pelat datar akan mendapatkan dua gaya, pertama, akibat tekanan, yaitu gaya tegak lurus terhadap permukaan pelat datar yang timbul akibat tekanan fluida. Kedua, akibat dari gaya gesek permukaan, yaitu gaya yang menyinggung permukaan secara tangensial akibat dari viskositas. Dua gaya ini menyebabkan timbulnya *boundary layer*. Pemberian kekasaran berupa alur melintang pada sebuah pelat datar akan menyebabkan perubahan karakteristik *boundary layer* yang terbentuk. Karakteristik *boundary layer* yang terbentuk akan dipengaruhi oleh variasi konfigurasi kekasaran permukaan dan kecepatan aliran *freestream*. *Stable vortex* yang terbentuk didalam alur akan menyebabkan adanya perubahan profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada aliran dekat permukaan. Penambahan kekasaran permukaan berupa alur melintang ternyata menyumbang nilai gaya *drag* akibat perbedaan tekanan pada sebelum dan sesudah alur, meskipun penurunan *shear stress* terjadi.



BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan metode numerik menggunakan *software Gambit 2.4.6* dan *Fluent 6.3.26*. Penelitian dengan metode numerik terdiri dari tiga tahapan utama yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Penelitian dilakukan di Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida.

Model yang digunakan berupa geometri pelat datar yang diberi alur bujur sangkar sepanjang pelat datar dengan dimensi kedalaman alur, lebar alur, dan lebar puncak alur yang sama. Terdapat tiga variasi ukuran alur yaitu 4mm, 10mm, dan 30mm. Bilangan *Reynolds* $Re_x = 2.16 \times 10^6$ dan kecepatan *freestream* 10 m/s.

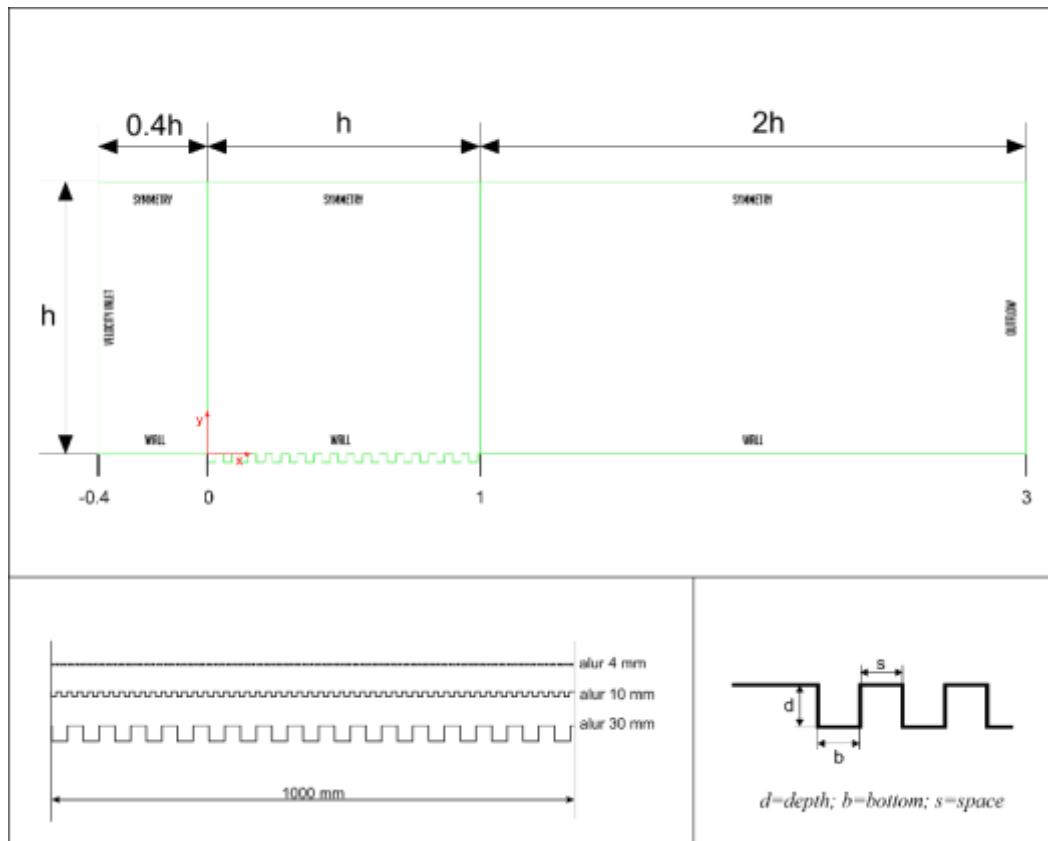
3.1 Langkah-Langkah Penelitian

3.1.1 *Pre-processing*

Tahap *Pre-processing* adalah tahap pembuatan model benda uji, pembuatan *meshing*, dan penentuan kondisi batas.

3.1.1.1 Benda Uji

Penelitian ini berupa pelat datar yang diberi alur bujur sangkar tipe-D yaitu memiliki kedalaman alur (d), lebar alur (s), dan lebar puncak (b) alur yang sama. Variasi ukuran alur tipe-D yaitu 4mm, 10mm, dan 30mm. Benda uji dapat dibuat dengan menggunakan *software Gambit 2.4.6*. Geometri benda uji dapat dilihat pada gambar 3.1. Pada geometri tersebut terdapat sisi *upstream* sepanjang 0.4m, daerah *test-section* dimana pelat akan diberi alur melintang tipe-D sepanjang 1m, kemudian pada sisi *downstream* sepanjang 2m.



Gambar 3.1 Geometri Benda Uji

3.1.1.2 Domain Simulasi

Dalam penelitian secara numerik, *domain* simulasi sedapat mungkin harus disesuaikan dengan keadaan dan kondisi dari benda uji atau *test section*. Dalam penelitian ini *domain* simulasi berupa pelat datar yang diberi alur melintang tipe-D yang dialiri fluida (udara). *Domain* simulasi dapat dilihat seperti pada Gambar 3.2.

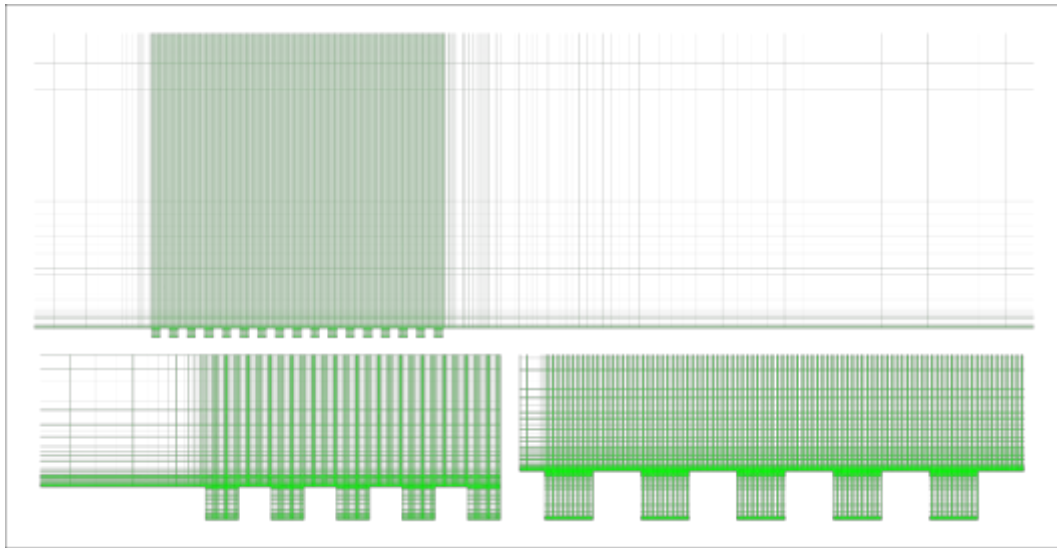
Pada sisi inlet didefinisikan sebagai *velocity inlet*, sedangkan pada sisi outlet didefinisikan sebagai *outflow*. Dinding bagian atas didefinisikan sebagai *symmetry* yaitu kondisi tanpa adanya gesekan. Pada *upstream* sebelum *test section* dan *downstream* setelah *test section* didefinisikan sebagai *wall*. Sedangkan pada *test section* yaitu sepanjang 1m didefinisikan sebagai *wall* agar dapat terlihat efek dari gesekan permukaan terhadap *boundary layer* yang terbentuk.



Gambar 3.2 Domain simulasi.

3.1.1.3 Meshing

Pembuatan *meshing* dilakukan dengan cara membagi model yang telah dibuat menjadi volum-volum kecil sehingga kondisi batas dan persamaan-persamaan yang digunakan dapat diterapkan kedalam volum kecil tersebut. Pada penelitian ini digunakan metode *meshing bottom-up* yaitu proses *meshing* dimulai dari *meshing* garis lalu *face* dan *volume*. Jumlah dan rasio dari *node* harus disesuaikan dengan panjang garis, bentuk garis serta gradien aliran, karena hal ini sangat berpengaruh terhadap hasil simulasi. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *quadrilateral-map* dengan distribusi *mesh* yang semakin rapat pada daerah alur. *Meshing* dapat dilihat pada Gambar 3.3. Kerapatan *meshing* pada dinding bawah ditentukan berdasarkan rumus teoritis yang dihitung kemudian dibandingkan dengan geometri berbeda, kerapatan yang berbeda, dan metode *solver* simulasi yang berbeda, sehingga didapat *meshing* yang paling kecil *error* dan paling optimal.



Gambar 3.3 *Meshing* pelat datar dengan alur 30 mm

3.1.1.4 Kondisi Batas (*Boundary Condition*)

Kondisi batas merupakan penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran, yaitu dengan pemberian beban kecepatan, tekanan serta kondisi batas turbulen pada *inlet* dan *outlet*. Kondisi batas merupakan hal yang berpengaruh sangat signifikan terhadap simulasi yang dilakukan. Kondisi batas harus disesuaikan dengan keadaan sebenarnya dari model benda uji. *Inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dengan kecepatan 10 m/s, *upstream* didefinisikan sebagai *wall*, dinding atas sebagai *symmetry*, *downstream* sebagai *wall*, sedangkan pada daerah uji didefinisikan sebagai *wall*, kemudian *outlet* berupa *outflow*.

3.1.2 *Processing*

Hasil *meshing* dari proses *pre-processing* diekspor ke *software* Fluent 6.3.26 untuk dilakukan *processing*. Langkah-langkah dalam *processing* adalah sebagai berikut:

a. *Models*

Pada langkah ini dilakukan permodelan dari aliran (estimasi karakteristik aliran), meliputi pemilihan model *solver* dan penentuan model turbulen yang digunakan. Simulasi akan dilakukan secara *unsteady* dengan *2nd-order implicit*



unsteady formulation. Permodelan yang akan digunakan adalah *viscous turbulent standart k-epsilon*.

b. Material

Permodelan ini menggunakan udara sebagai fluida kerja dengan $(\rho) = 1,17 \text{ kg/m}^3$, viskositas $(\mu) = 1,86 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$. Jenis dan properti dari material dimasukkan sesuai dengan kondisi dari lingkungan, yaitu pada temperatur 30°C dan tekanan 1 atm

c. Operating Condition

Operating Condition adalah penentuan kondisi daerah operasi yang biasanya merupakan perkiraan tekanan pada kondisi STP (*Standard Temperature and Pressure*) yaitu 1 atm atau 101325 Pascal .

c. Boundary Condition

Boundary Condition adalah penentuan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji dengan menentukan *inlet*, *outlet* serta kondisi pada dinding. *Inlet* merupakan sisi aliran datang, berupa kecepatan sebesar 10 m/s sedangkan *outlet* berupa *outflow*.

d. Solution

Solusi pada penelitian ini adalah menggunakan *second order* untuk *pressure*, *momentum*, *turbulent kinetic energy*, dan *turbulent dissipation rate*.

e. Initialize

Merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. *Initialize* dihitung dari *velocity inlet*.

f. Monitor Residual

Merupakan bagian tahapan dalam penyelesaian masalah berupa proses iterasi sampai mencapai kriteria konvergensi yang diinginkan. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-6} , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga lebih kecil dari 10^{-6} .

g. Iterasi

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada Fluent 6.3.26. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai kriteria konvergensi sebesar 10^{-6} . Untuk metode *unsteady*, perhitungan *time step*



size dan *number of iteration* perlu dilakukan berdasarkan geometri yang digunakan agar didapatkan hasil perhitungan yang akurat. Berdasarkan rumus CFL (*Courant, Friedrich, Lewy Condition*) didapatkan *time step size* sebesar 0.001 s dan *number of time step* sebesar 1000 dengan *maximal iterations per time step* yaitu 20 iterasi. Dengan menggunakan *software* Fluent 6.3.26, parameter pemodelan serta kondisi yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing* akan dihitung (diiterasi) sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Jika kriteria konvergensi tercapai sesuai pengaturan *monitor residual* maka tahapan dilanjutkan pada *post-processing* dan jika tidak tercapai tahapan akan kembali ke tahapan perbaikan *meshing*.

Ringkasan dari poin A-H dapat dilihat pada table 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Ringkuman tahapan *processing*

<i>Solver</i>		<i>pressure based</i>
<i>Time</i>		<i>unsteady</i>
<i>Unsteady Formulation</i>		<i>2nd-order implicit</i>
<i>Gradient Option</i>		<i>least squares cell based</i>
<i>Model</i>		<i>k-epsilon standart</i>
<i>Density (kg/m³)</i>		1.177 saat 30° C
<i>Viscosity (kg/m-s)</i>		0.00001846
<i>Operation Pressure (Pa)</i>		101325
<i>Velocity Inlet (m/s)</i>		10
<i>Inlet TI (%)</i>		1%
<i>Inlet Length Scale (m)</i>		0.01
<i>Pressure-Velocity Coupling</i>		<i>SIMPLE</i>
<i>Discretization</i>	<i>Pressure</i>	<i>standart</i>
	<i>Momentum</i>	<i>second order</i>
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>second order</i>
	<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second order</i>
<i>Convergence Criterion</i>		10 ⁻⁶
<i>Iterate</i>	<i>Time Step Size</i>	0.001



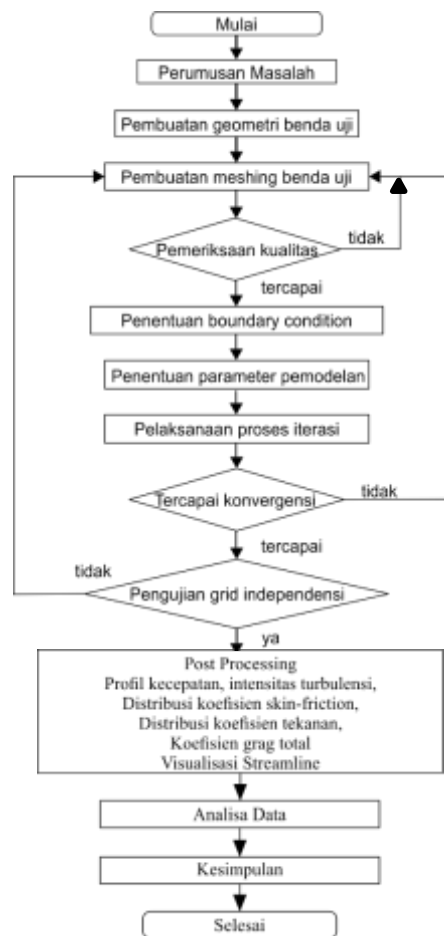
	<i>Number of Time Step</i>	1000
	<i>Max. Iteration per Time Step</i>	20
<i>Reference Area (m²)</i>		3.4

3.1.3 Post-processing

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan pada *Fluent 6.3.26*. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai kriteria konvergensi sebesar 10^{-6} . Dengan menggunakan *software Fluent 6.3.26*, parameter pemodelan serta kondisi yang telah ditetapkan pada saat *pre-processing* akan dihitung (diiterasi) sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. *Post-processing* dapat dilakukan dengan berbagai macam *software* yang terdapat saat ini, selain dapat langsung diproses melalui *Fluent*, terdapat pula *software* khusus *post-processing* salah satunya yaitu *Tecplot*. Terdapat kelebihan dan kekurangan pada masing-masing *software*, sehingga penggunaan berbagai macam *software post-processing* direkomendasikan agar dapat dibandingkan mana yang terbaik.

3.2 Flowchart

Secara singkat prosedur penelitian secara numerik pada pelat datar dengan alur melintang tipe-D dapat dijelaskan dengan menggunakan *flowchart* yang akan ditunjukkan pada Gambar 3.4.

Gambar 3.4 *Flowchart*



BAB IV

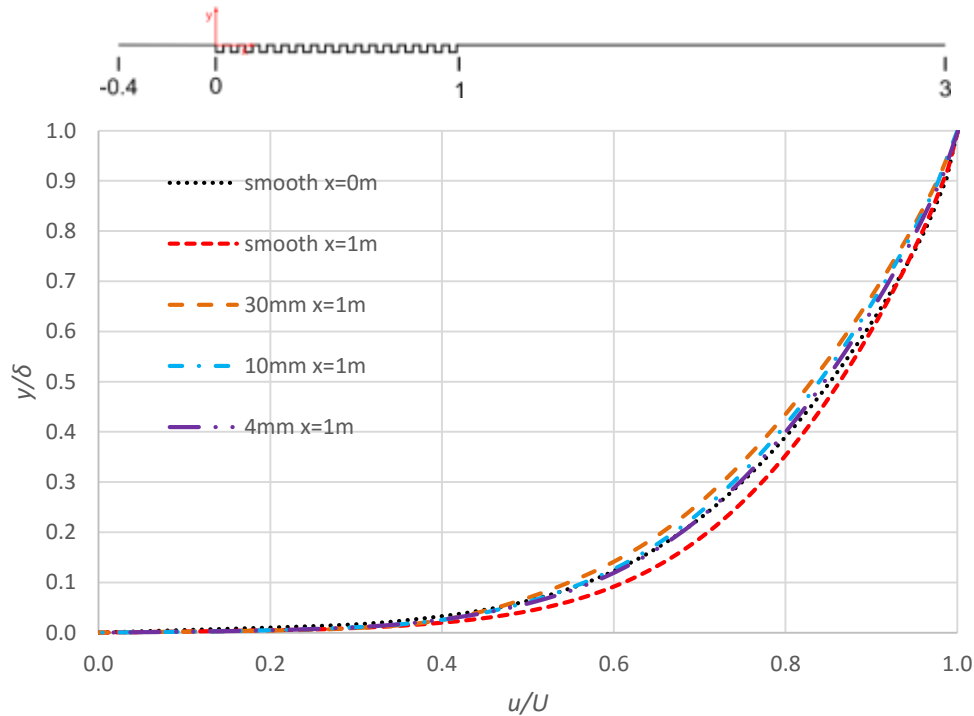
ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil dari *post-processing* untuk pelat datar tanpa alur dan dengan alur melintang tipe-D. Ukuran alur bervariasi yaitu 4 mm, 10 mm, dan 30 mm. Nilai dari Bilangan *Reynolds* yang digunakan yaitu $Re_x = 2.16 \times 10^6$. Pembahasan yang dilakukan meliputi: profil kecepatan, intensitas turbulensi, distribusi koefisien tekanan, distribusi koefisien *skin-friction*, koefisien *drag* total dan visualisasi aliran.

4.1 Profil Kecepatan

Analisa profil kecepatan akan dibandingkan pada pelat datar (*smooth-wall*) dengan pelat beralur melintang berukuran 4mm, 10mm, dan 30mm. Dari profil kecepatan aliran dapat terlihat fenomena-fenomena yang terjadi akibat adanya tegangan geser. Tegangan geser tersebut terjadi karena viskositas dari fluida yang mengalir diatas permukaan dan adanya koefisien *skin-friction*. Profil kecepatan aliran pada penelitian ini dipresentasikan dalam grafik parameter tanpa dimensi yaitu y/δ fungsi u/U_∞ . Pada gambar 4.1 profil kecepatan yang diamati yaitu pada $x=0m$ dan pada $x=1m$.

Gambar 4.1 menunjukkan profil kecepatan pada *smooth-wall* saat $x=0m$ dibanding dengan *smooth-wall* saat $x=1m$, pelat dengan alur tipe-D 4mm, 10mm, dan 30mm. Profil kecepatan untuk pelat datar (*smooth-wall*) pada $x=1m$ terlihat lebih turbulen dari pada saat $x=0m$. Sedangkan pada pelat beralur tipe-D berbagai ukuran saat $x=1m$ terlihat lebih laminar daripada saat $x=0m$. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh alur terhadap profil kecepatan diatas pelat datar. Terbentuk *vortex* didalam alur yang berfungsi seperti *slider* sehingga merubah *boundary layer* yang terbentuk diatas pelat datar.



Gambar 4.1 Profil kecepatan pelat datar (*smooth-wall*) dan pelat beralur melintang tipe-D 4mm, 10mm, dan 30mm.

Tabel 4.1 menunjukkan *shape factor boundary layer* yang terbentuk pada pelat datar (*smooth-wall*) dan pelat beralur melintang tipe-D 4mm, 10mm, dan 30mm saat $x=1m$. Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa efek pemberian alur melintang tipe-D membuat aliran lebih laminar dibanding tanpa alur (*smooth-wall*). *Shape factor* (H) sendiri adalah salah satu parameter yang dapat digunakan sebagai acuan apakah profil kecepatan turbulen atau *laminar*. Secara umum aliran turbulen memiliki *shape factor* yang bernilai 1.3-1.5, sedangkan aliran *laminar* secara umum memiliki nilai 2,59 (Blasius, 1908).

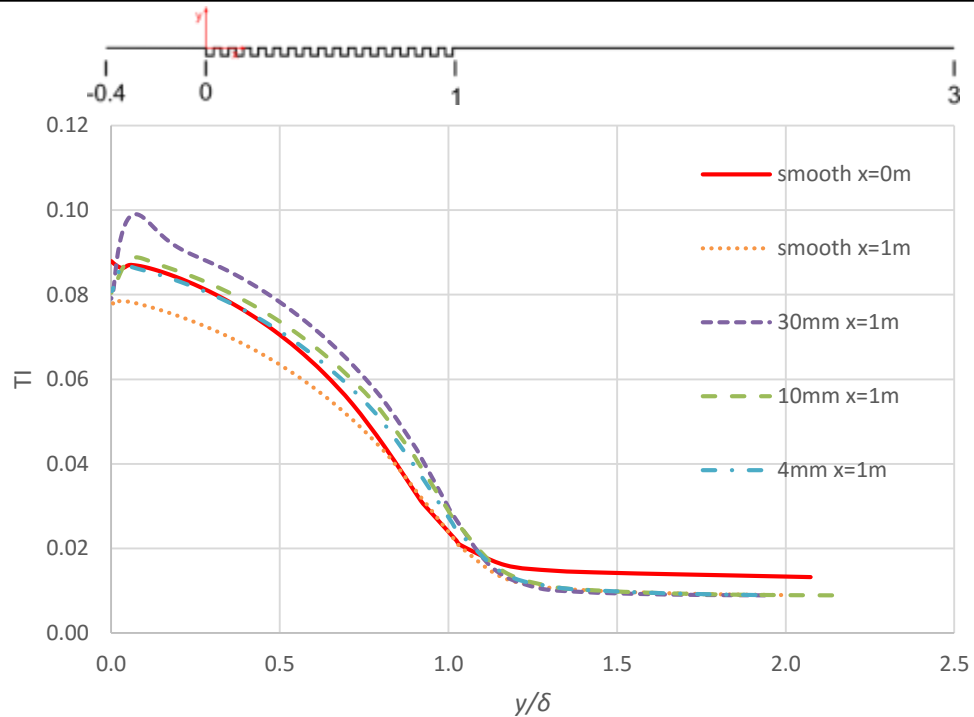


Tabel 4.1 *Shape Factor* pelat datar (*smooth-wall*) dan pelat beralur melintang tipe-D 4mm, 10mm, dan 30mm saat $x=1m$.

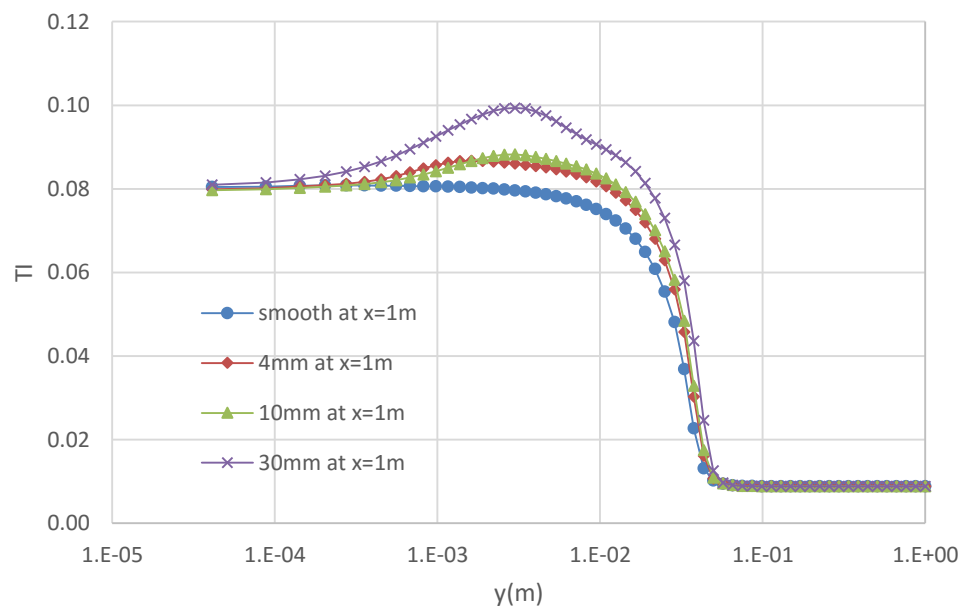
<i>Shape Factor</i> saat $x=1m$	
Geometri	$H=\delta^*/\theta$
<i>smooth-wall</i>	1.4861
4mm	1.5189
10mm	1.5234
30mm	1.5486

4.2 Intensitas Turbulensi

Pada gambar 4.2 terdapat nilai intensitas turbulensi pada pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur 4mm, 10mm, dan 30mm saat $x=1m$ terhadap *non-dimensional* parameter y/δ . Terlihat pada daerah $x=1m$, efek pemberian alur tipe-D meningkatkan intensitas turbulensi dibanding pelat datar (*smooth-wall*), dimana tingkat intensitas meningkat seiring meningkatnya ukuran alur. Efek koefisien *skin-friction* dan *pressure-gradient* akibat penambahan alur berkontribusi pada peningkatan nilai intensitas turbulensi sepanjang pelat datar (*smooth-wall*) dan pelat beralur tipe-D. Meningkatnya intensitas turbulensi menandakan meningkatnya momentum aliran fluida. Peningkatan intensitas turbulensi terjadi maksimal pada alur tipe-D ukuran 30mm dibanding dengan tipe-D ukuran 10mm, 4mm, maupun pelat tanpa alur. Pada gambar 4.4 merupakan plot logaritmik dari intensitas turbulensi pada pelat datar (*smooth-wall*), dan pelat beralur tipe-D 4mm, 10mm, 30mm.



Gambar 4.2 Intensitas turbulensi pada pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur 4mm, 10mm, dan 30mm saat $x=0m$ dan $x=1m$.

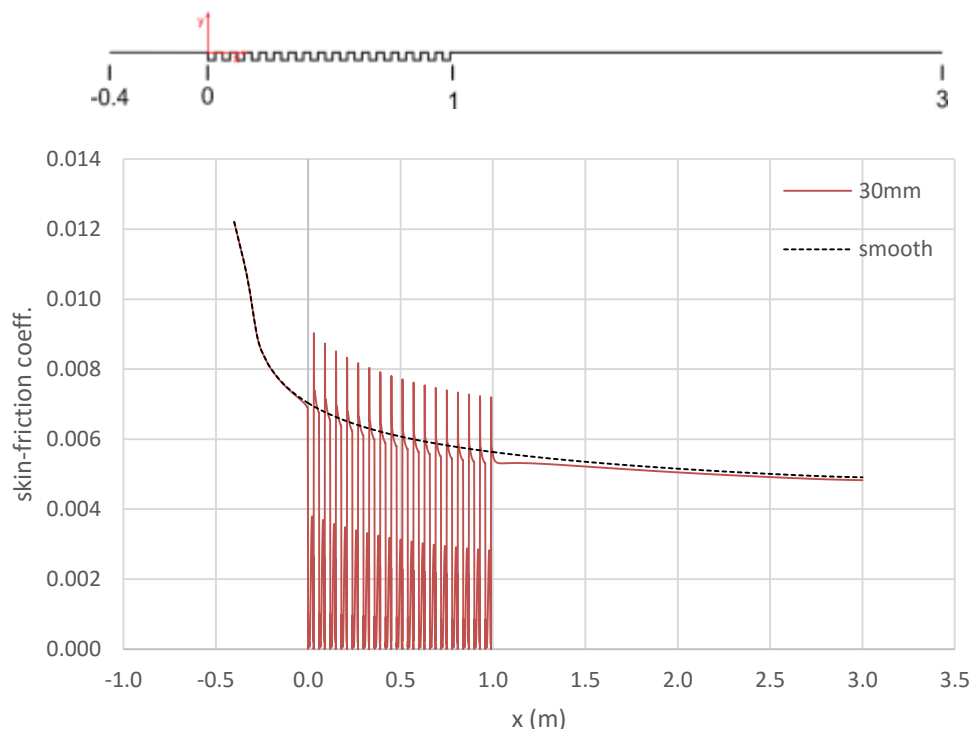


. Gambar 4.3 Plot logaritmik intensitas turbulensi pada pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur 4mm, 10mm, dan 30mm saat $x=1m$.

4.3 Distribusi Koefisien *Skin-friction*

Analisa data dan pembahasan mengenai distribusi koefisien *skin-friction* (C_f) pada sepanjang pelat datar (*smooth-wall*) dan pelat dengan variasi ukuran alur tipe-D 4mm, 10mm dan 30mm dilakukan agar dapat diketahui efek dari pemberian alur melintang tipe-D. Gambar 4.4 menampilkan perbandingan nilai koefisien gesek (C_f) mulai $x = -0.4\text{m}$ hingga $x = 3\text{m}$ antara pelat datar (*smooth-wall*) dengan pelat beralur tipe-D ukuran 30mm.

Pada gambar 4.4 terlihat bahwa efek pemberian alur melintang tipe-D pada sebuah pelat datar menurunkan nilai koefisien *skin-friction* (C_f) dibanding pada pelat datar (*smooth-wall*) hanya pada ukuran 30mm, sedangkan pada ukuran 4mm dan 10mm mengalami kenaikan dibanding pelat datar (*smooth-wall*). Tabel 4.1 menunjukkan nilai C_f saat $x=1\text{m}$ pada pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur melintang tipe-D 4mm, 10mm, dan 30mm. Nilai C_f terbesar terjadi pelat beralur tipe-D ukuran 4mm dan nilai C_f paling kecil pada pelat beralur melintang dengan ukuran alur 30mm.



Gambar 4.4 Distribusi koefisien *skin-friction* (C_f) pada pelat datar (*smooth-wall*) dengan pelat beralur tipe-D 30mm saat $x = -0.4\text{m}$ hingga $x = 3\text{m}$.



Tabel 4.2 Nilai C_f saat $x = 1$ m pada pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur 4mm, 10mm, dan 30mm.

	C_f saat $x = 1$ m
<i>smooth-wall</i>	0.00563
4mm	0.005913
10mm	0.005866
30mm	0.005566

Penurunan harga C_f pada pelat beralur tipe-D dibanding pelat datar (*smooth-wall*) adalah akibat terbentuknya *semi-stable vortex* didalam alur. Terbentuknya *semi-stable vortex* ini menyebabkan fluida yang melintas diatas alur dapat melintas tanpa mengalami gesekan dengan permukaan. Fluida yang melintas diatas alur ini akan bersinggungan dengan *semi-stable vortex* akan terjadi pertukaran energi diantara keduanya. Semakin besar *semi-stable vortex* yang terbentuk semakin dapat mengurangi gesekan permukaan yang dialami fluida yang mengalir diatas alur.

4.4 Distribusi Koefisien Tekanan

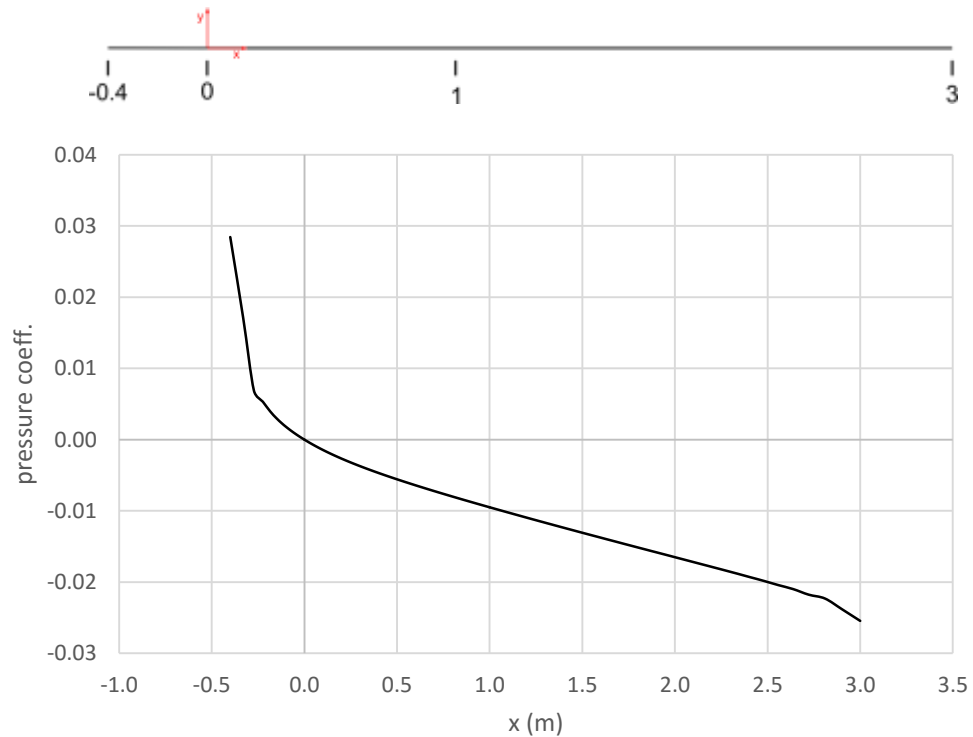
Distribusi koefisien tekanan sepanjang *domain wall* untuk pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur 30mm, 10mm, dan 4mm telah digambarkan pada gambar 4.5, 4.6, 4.7, dan 4.8. Pada pelat beralur terlihat grafik yang berulang polanya. Untuk pembahasan mendetail, maka akan digambarkan distribusi koefisien tekanan pada alur pertama *domain wall* pelat beralur 30mm.

4.4.1 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Datar (*Smooth-Wall*)

Gambar 4.5 merupakan distribusi koefisien pelat datar (*smooth-wall*) sepanjang *domain wall*. Seharusnya menurut penurunan persamaan momentum, untuk pelat datar 2-dimensi tidak terdapat *pressure-gradient*. Pergerakan fluida bisa menjadi penyebabnya, sebagai contoh : sebuah pelat bergerak melewati fluida diam, pada contoh tersebut maka tidak terbentuk *pressure-gradient*. Contoh diatas hanya sebagai contoh-kebalikan yang membuktikan bahwa mengapa terbentuk *pressure-gradient* pada pelat datar (*smooth-wall*). Alasannya adalah dibutuhkan *pressure-gradient* untuk mengakselerasi sebuah aliran fluida, karena pada awalnya



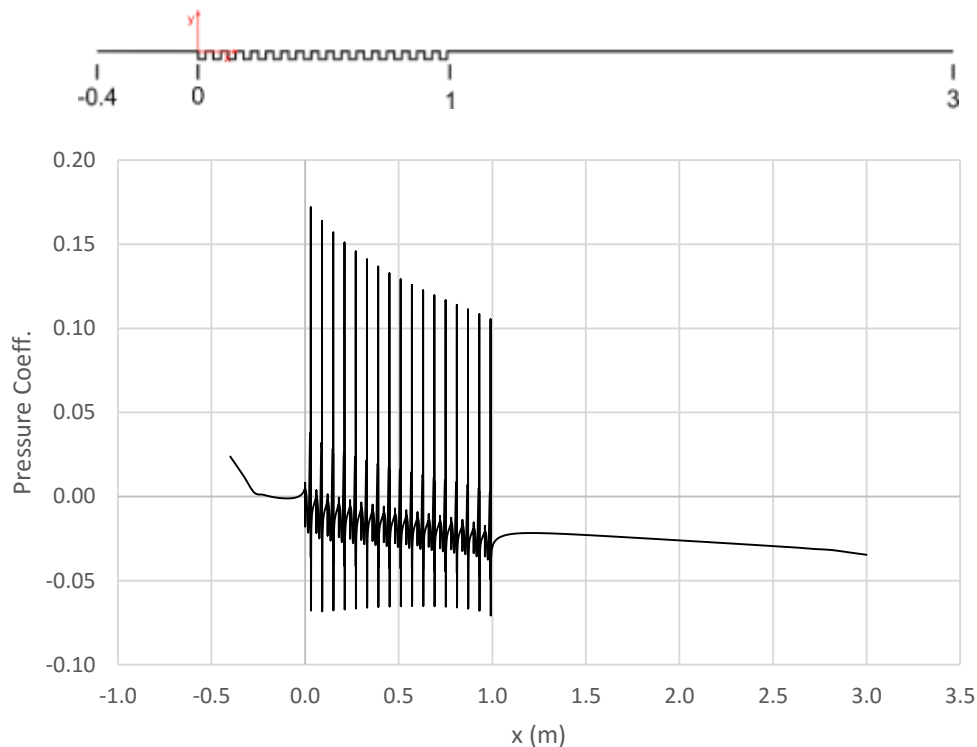
fluida tidak bergerak. Sebagai asumsi, sebuah aliran telah diatur untuk memiliki kecepatan tertentu, kecepatan dari aliran akan tetap konstan kecuali aliran menemui *pressure-gradient*.



Gambar 4.5 Distribusi koefisien tekanan pada pelat datar (*smooth-wall*) sepanjang *domain wall*.

4.4.2 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 30mm

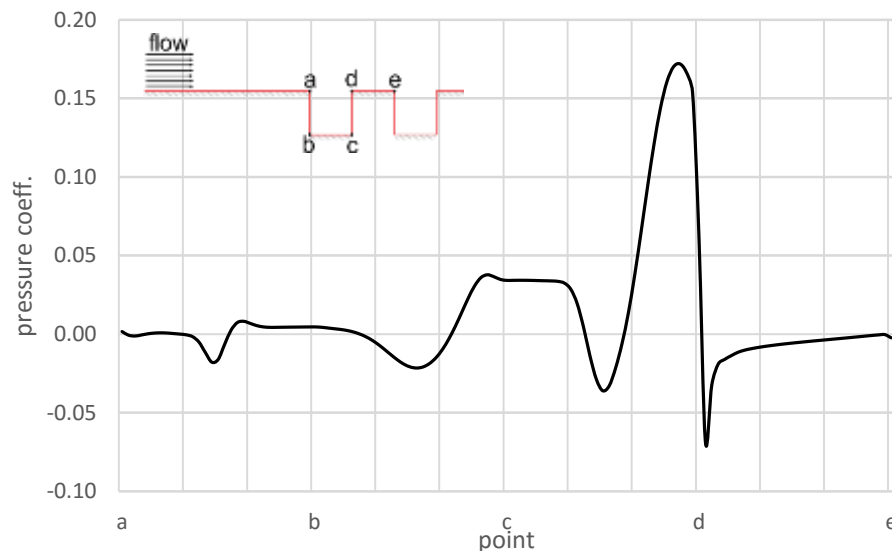
Gambar 4.6 merupakan distribusi koefisien pelat beralur tipe-D 30mm sepanjang *domain wall*. Terlihat saat melewati alur terjadi pola garis yang berulang dengan titik puncak garis yang menurun seiring jarak.



Gambar 4.6 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 30mm sepanjang *domain wall*.

Apabila koefisien tekanan pada sepanjang jarak antar titik-titik (a-b-c-d-e) digambarkan pada sebuah grafik, maka akan terlihat pada gambar 4.7. Gambar 4.7 secara fisik dapat disimpulkan bahwa terdapat *semi-stable vortex* yang terbentuk didalam alur. Daerah yang tersinggung vektor kecepatan dari *semi-stable vortex* akan memiliki nilai C_p yang lebih rendah daripada yang tidak bersinggungan. Titik puncak berada pada titik d, karena saat titik tersebut kecepatan aliran mengalami perlambatan (menabrak dinding).

Pelat dengan alur tipe-D ukuran 30mm menghasilkan nilai koefisien tekanan tertinggi dibanding pelat dengan ukuran 10mm dan 4mm, yaitu sebesar 0.172072 pada $y/d = -1/7.75$ diantara titik c-d pada gambar 4.7. Titik ini disebut juga titik stagnasi, yaitu titik disaat kecepatan lokalnya bernilai nol dan tekanan statis nya bernilai paling tinggi.

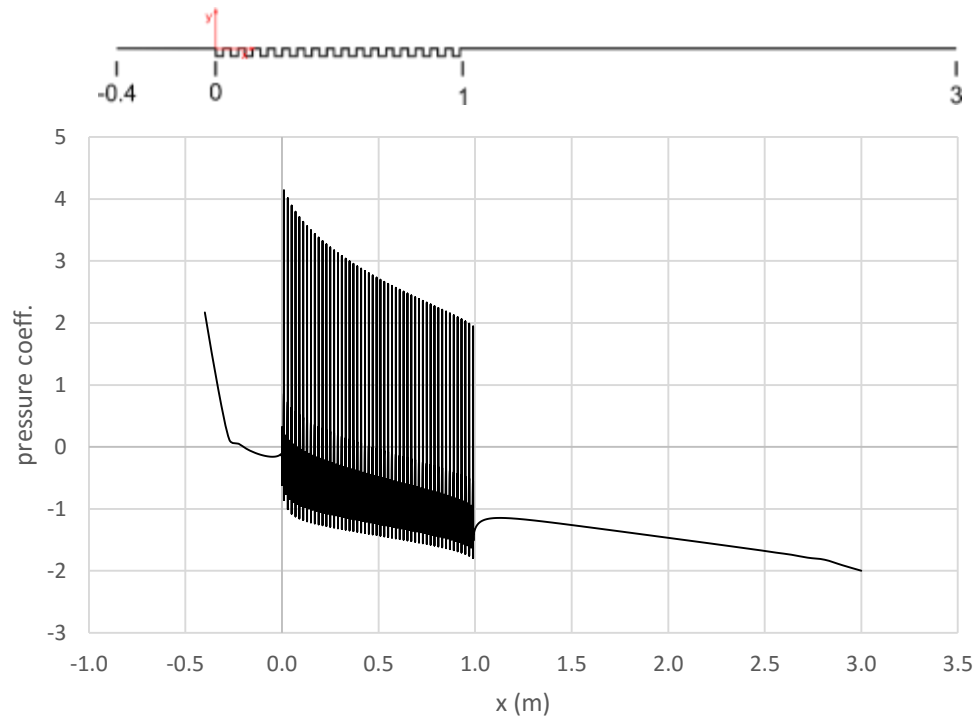


Gambar 4.7 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 30mm saat alur pertama.

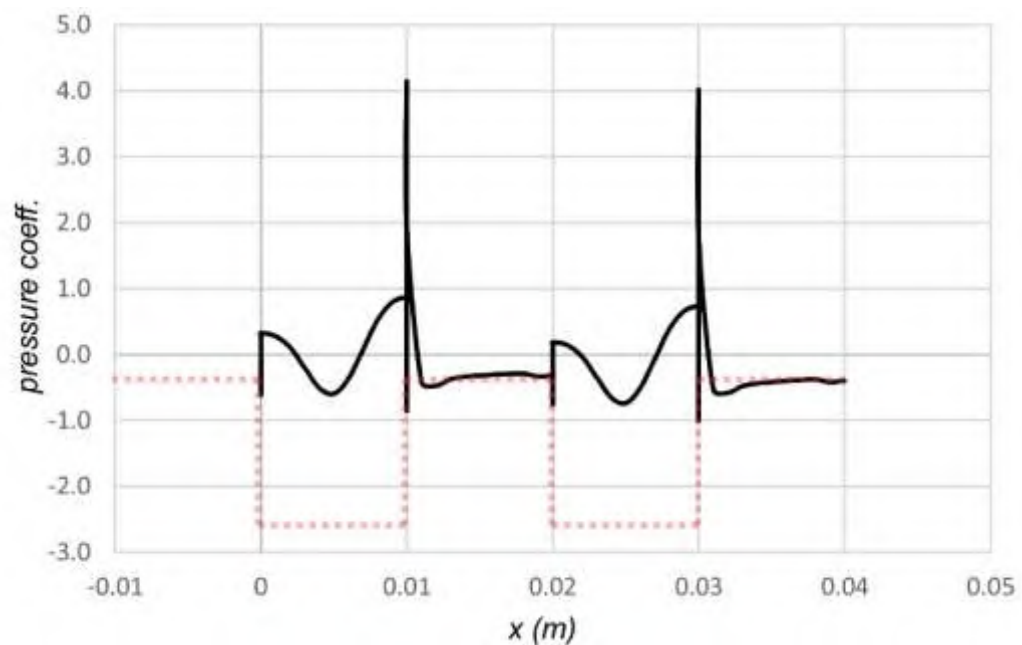
4.4.3 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 10mm

Gambar 4.8 merupakan distribusi koefisien pelat beralur tipe-D 10mm sepanjang *domain wall*. Terlihat saat melewati alur terjadi pola garis yang berulang dengan titik puncak garis yang menurun seiring jarak.

Lebih mendetail, gambar 4.9 merupakan distribusi koefisien tekanan pada dua alur pertama pelat beralur tipe-D ukuran 10mm. Sesuai dengan fenomena fisiknya, saat melewati *upstream* alur hingga puncaknya saat ujung *downstream* alur aliran mengalami kenaikan tekanan, yaitu meningkatkan energi potensial, menurunkan energi kinetik sehingga terjadi deselerasi. Sesaat melewati *downstream* alur, aliran mengalami akselerasi dan terjadi penurunan tekanan. Setiap puncak dari grafik berpengaruh terhadap terbentuknya *pressure-drag*, yaitu gaya *drag* akibat terbentuk akibat gradien tekanan.



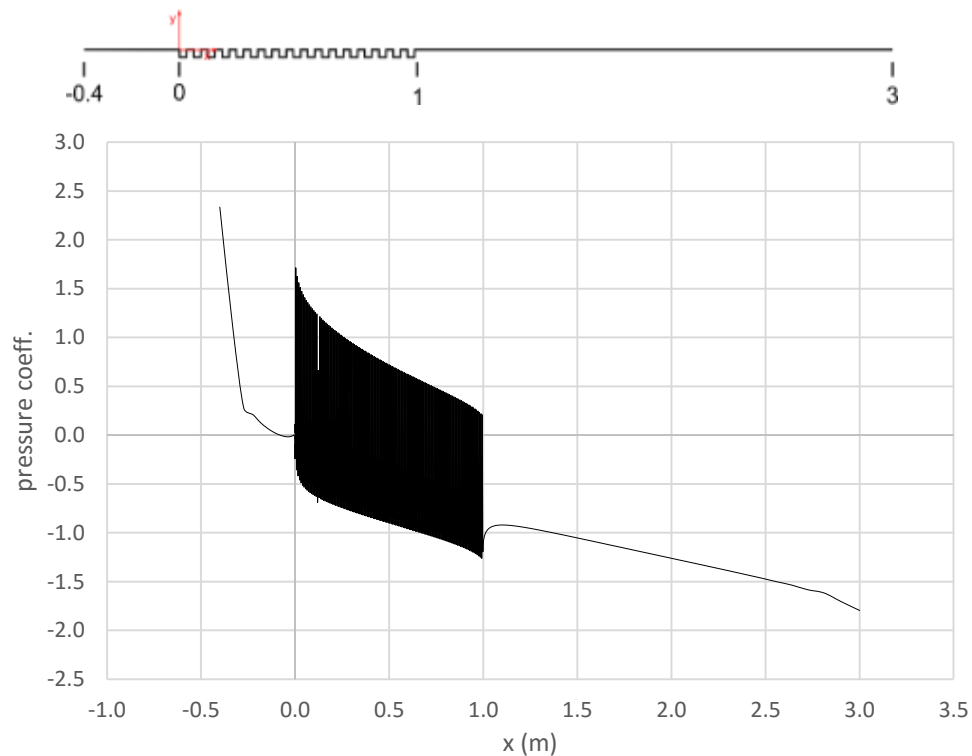
Gambar 4.8 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 10mm sepanjang *domain wall*.



Gambar 4.9 Distribusi koefisien tekanan pada alur pertama pelat beralur tipe-D 10mm saat dua alur pertama.

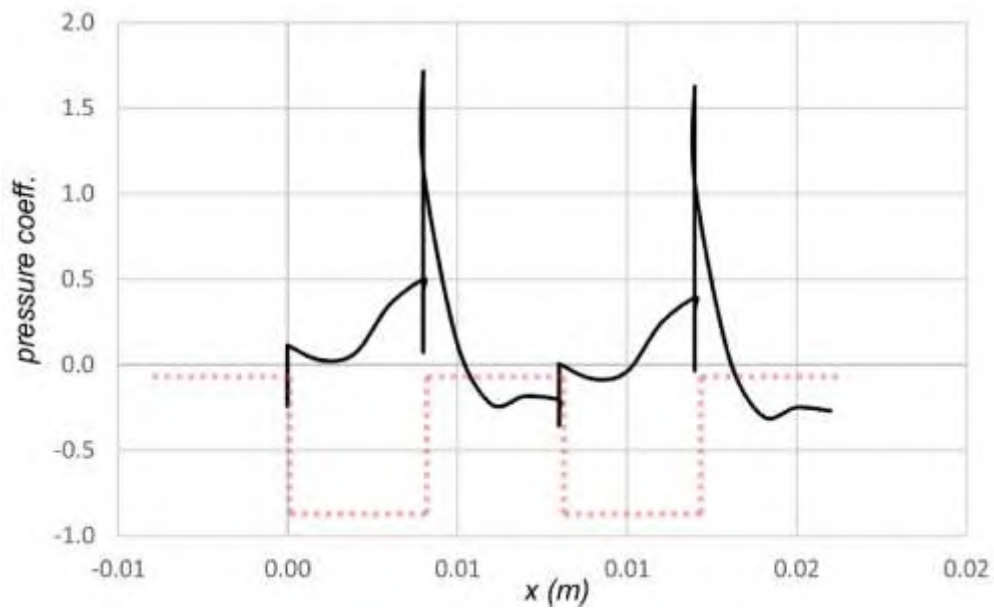
4.4.4 Distribusi Koefisien Tekanan pada Pelat Beralur 4mm

Gambar 4.10 merupakan distribusi koefisien pelat beralur tipe-D 4mm sepanjang *domain wall*. Terlihat saat melewati alur terjadi pola garis yang berulang dengan titik puncak garis yang menurun seiring jarak.



Gambar 4.10 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 4mm sepanjang *domain wall*.

Lebih mendetail, gambar 4.11 merupakan distribusi koefisien tekanan pada dua alur pertama pelat beralur tipe-D ukuran 4mm.



Gambar 4.11 Distribusi koefisien tekanan pada pelat beralur tipe-D 4mm saat dua alur pertama.

4.5 Koefisien Drag Total

Koefisien *drag* total dikontribusi oleh *pressure/form drag* yaitu gaya *drag* akibat gradien tekanan dan *viscous/friction drag* yaitu gaya *drag* akibat gesekan permukaan. Gaya *drag* merupakan gaya yang mempunyai arah berlawanan terhadap arah aliran *freestream*. Perbedaan nilai koefisien sepanjang pelat datar dan pelat beralur melintang tipe-D akan dibandingkan.

Tabel 4.2 menunjukkan nilai koefisien *drag* (C_d) pada pelat datar dan pelat beralur melintang tipe-D dengan variasi ukuran 4 mm, 10 mm, dan 30 mm pada $Re_x = 2.16 \times 10^6$. Dari Tabel 4.2 dapat diketahui pemberian alur melintang tipe-D pada sebuah pelat datar akan meningkatkan nilai koefisien *drag* total. Nilai C_d *approximate* atau berdasarkan teori didapat dari rumus. Peningkatan nilai koefisien *drag* tekanan disebabkan besarnya gradien tekanan diluar alur dan didalam alur walaupun nilai koefisien *friction drag* mengalami penurunan. Nilai koefisien *drag* total akibat penambahan alur melintang tipe-D dibandingkan dengan tanpa alur meningkat seiring dengan peningkatan ukuran alur melintang. Peningkatan terbesar terjadi pada alur ukuran 30 mm yaitu 14.1%, sedangkan paling kecil pada ukuran alur 4 mm yaitu 11.7% dibandingkan dengan pelat datar (*smooth-wall*). Dapat



disimpulkan pula bahwa semakin besar ukuran alur tipe-D akan meningkatkan nilai koefisien *drag* tekanan namun menurunkan nilai koefisien *friction drag*. Karena peningkatan pada koefisien *drag* tekanan lebih signifikan daripada penurunan koefisien *friction drag*, maka koefisien *total drag* mengalami peningkatan.

Tabel 4.8 Koefisien *Drag* (C_d) pada pelat datar dan pelat beralur melintang tipe-D dengan variasi ukuran alur

<i>UNSTEADY</i> $Re_x = 2.16 \times 10^6$						
	<i>Pressure Drag Coeff.</i>	<i>Viscous Drag Coeff.</i>	<i>Total Drag Coeff.</i>	Peningkatan % (dibanding smooth- wall)	<i>Cd approx.*</i>	<i>error %</i>
<i>smooth wall</i>	0	0.00588	0.00588	-	0.00401	46.45
4 mm	0.00120	0.00537	0.00657	11.7		
10 mm	0.00136	0.00532	0.00669	13.7		
30 mm	0.00199	0.00472	0.00671	14.1		

*) *power-law* $\frac{u}{U} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{\frac{1}{7}}$



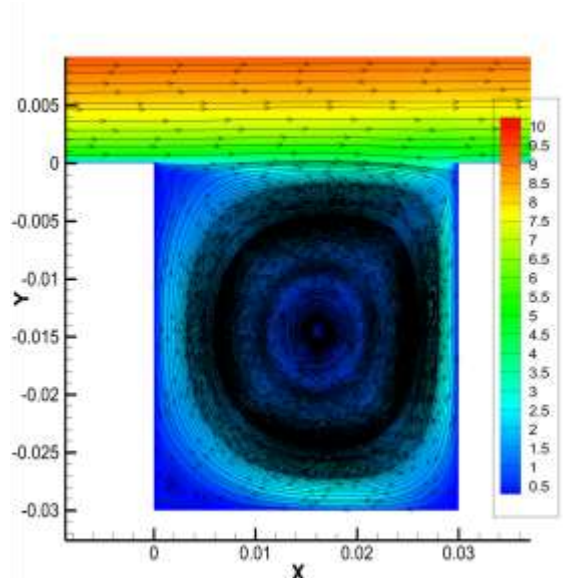
4.6 Visualisasi

4.6.1 Visualisasi Kontur dan Vektor Kecepatan

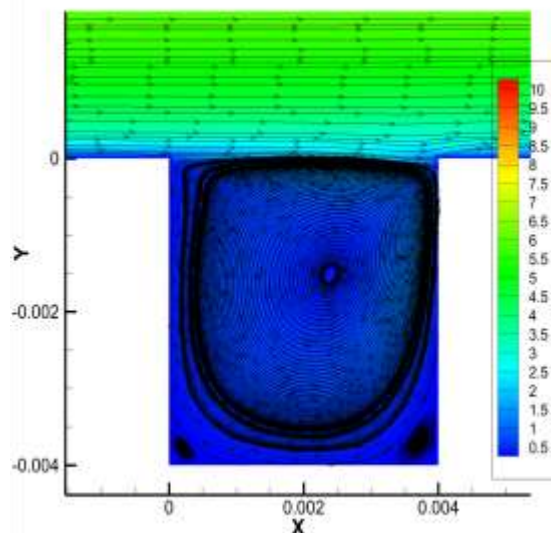
Visualisasi kontur kecepatan dapat dilihat pada gambar 4.12 yaitu pada pelat beralur tipe-D ukuran 30mm, 10mm dan 4mm. Dapat terlihat didalam alur terbentuk *semi-stable vortex*. Semakin luas alur semakin luas pula *semi-stable vortex* yang terbentuk. *Semi-stable vortex* nantinya akan berperan penting dalam penurunan nilai koefisien *skin-friction*. Visualisasi yang diambil yaitu saat aliran melewati alur pertama. Pada pelat beralur tipe-D ukuran 30mm, 10mm, dan 4mm terbentuk pula *secondary vortex* pada sisi *upstream* bawah alur.

Secondary vortex terbentuk adalah akibat dari *semi stable vortex* yang terbentuk tidak berada simetri ditengah-tengah alur, menyebabkan terdapat ruang yang tidak tersinggung vektor kecepatan *semi stable vortex* di *upstream* bawah alur. *Semi stable vortex* yang terbentuk memiliki arah CW, sedangkan *secondary vortex* sebaliknya. Gambar 4.12 merupakan hasil visualisasi melalui *software postprocessing Tecplot*, dimana kontur kecepatan sebagai *background* dan dilengkapi garis *streamtraces*. Terdapat kelebihan *postprocessing Tecplot* dibanding *postprocessing* melalui *software Fluent* apabila ingin menampilkan vektor kecepatan. Kelebihannya yaitu dapat menampilkan *streamtraces* sehingga dapat terlihat jelas *vortex* yang terbentuk.

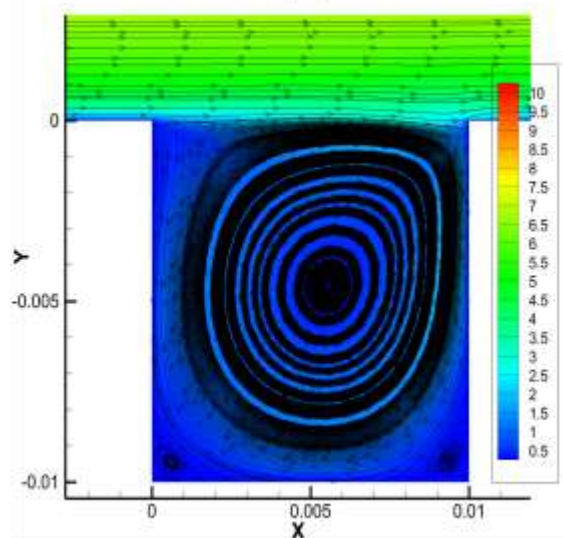




(a)



(b)



(c)

Gambar 4.12 Visualisasi kontur kecepatan didalam alur pertama yang dilengkapi dengan streamtraces pada pelat beralur tipe-D ukuran :

(a). 30mm

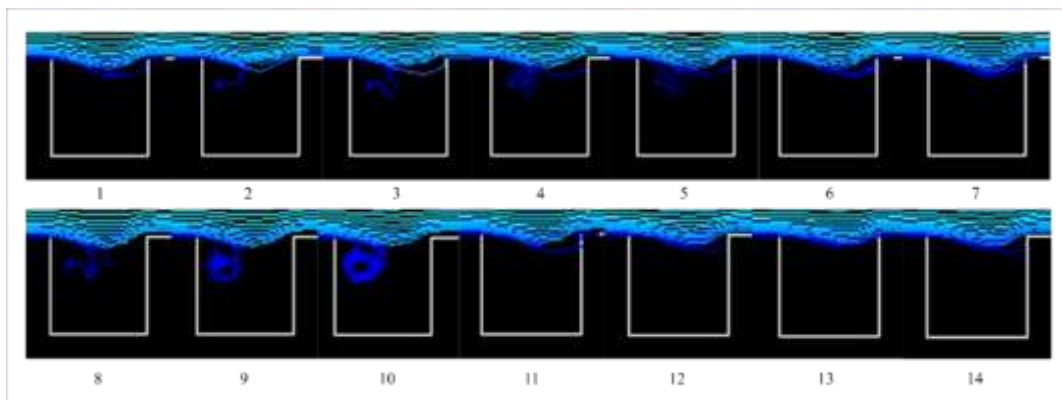
(b). 10mm

(c). 4mm

4.6.2 Visualisasi *Inflow-Ejection* pada Alur

Terdapat fenomena lain yang terjadi didalam alur, yaitu *inflow-ejection* fluida yang berada didalam alur, yaitu fluida didalam alur sesaat mengalami pergantian (*inflow-ejection*). *Ejection* yaitu saat fluida keluar dari dalam alur kemudian sesaat itu proses *inflow* terjadi, yaitu saat fluida masuk kedalam alur membentuk *semi-stable vortex*. *Ejection* terjadi hampir disepanjang atas alur, sedangkan *inflow* terjadi sesaat batas downstream alur.

Gambar 4.13 menunjukkan proses terjadinya *inflow-ejection* pada alur pertama pelat beralur 30mm dengan visualisasi *pathlines* yang dilepas dari *domain inlet*. Nomor 1-7 terjadi saat detik ke 1×10^{-3} , selanjutnya nomor 8-14 terjadi saat detik ke 2×10^{-3} . Proses *inflow* terjadi pada nomor 2-4 dan 8-10. Sedangkan proses *ejection* terjadi pada nomor 5-7 dan 11-13.



Gambar 4.13 Proses terjadinya *inflow-ejection* fluida pada alur pertama pelat beralur 30mm.

Hasil visualisasi yang didapat pada gambar 4.13 menunjukkan proses *inflow-ejection* yang terjadi terlihat kuat dan sekali waktu terlihat lemah. Proses *ejection* tidak mengganggu *semi-stable vortex* yang terbentuk didalam alur, namun proses *inflow* akan memperkuat kecepatan *semi stable vortex* didalam alur. Proses *inflow-ejection* ini sesuai dengan apa yang dilaporkan oleh **Elavarasan** (1996). **Elavarasan** (1996) menyatakan waktu *inflow* atau *ejection* dalam bentuk parameter tidak berdimensi dengan rumus :



$$t^+ = \frac{t \cdot (u^*)^2}{\nu} \quad (4.1)$$

Dimana : t = periode (s)

u^* = *frictional velocity* (m/s)

ν = viskositas kinmetis (m²/s)

dan frekuensi dalam bentuk parameter tidak berdimensi yaitu :

$$f^+ = \frac{1}{t^+} \quad (4.2)$$

Waktu yang didapatkan untuk satu siklus *inflow-ejection* yang diperoleh dari hasil visualisasi gambar 4.13 yaitu 1×10^{-3} detik. Memiliki harga $t^+ = 16.8$ dan harga $f^+ = 0.0595$.

Lampiran Perhitungan Shape Factor untuk Pelat Beralur Tipe-D 30mm

y	u	u/U ∞	1-(u/Uinf)	dy	(1-u/Uinf)*dy	(u/Uinf)*(1-(u/Uinf))*dy	δ^*
0.0000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0079044
0.0002010	2.3081600	0.2308160	0.7691840	0.0002010	0.0001546	0.0000357	θ
0.0004244	3.1628300	0.3162830	0.6837170	0.0002233	0.0001527	0.0000483	0.0052471
0.0006725	3.6245000	0.3624500	0.6375500	0.0002481	0.0001582	0.0000573	H
0.0009482	3.9348700	0.3934870	0.6065130	0.0002757	0.0001672	0.0000658	1.5064309
0.0012545	4.1841500	0.4184150	0.5815850	0.0003063	0.0001781	0.0000745	
0.0015948	4.4054900	0.4405490	0.5594510	0.0003403	0.0001904	0.0000839	
0.0019728	4.6143000	0.4614300	0.5385700	0.0003781	0.0002036	0.0000940	
0.0023928	4.8189600	0.4818960	0.5181040	0.0004200	0.0002176	0.0001049	
0.0028595	5.0244300	0.5024430	0.4975570	0.0004666	0.0002322	0.0001167	
0.0033779	5.2334800	0.5233480	0.4766520	0.0005184	0.0002471	0.0001293	
0.0039539	5.4471200	0.5447120	0.4552880	0.0005760	0.0002622	0.0001428	
0.0045938	5.6646800	0.5664680	0.4335320	0.0006399	0.0002774	0.0001572	
0.0053047	5.8842900	0.5884290	0.4115710	0.0007109	0.0002926	0.0001722	
0.0060946	6.1035900	0.6103590	0.3896410	0.0007899	0.0003078	0.0001878	
0.0069721	6.3208300	0.6320830	0.3679170	0.0008775	0.0003229	0.0002041	
0.0079471	6.5356500	0.6535650	0.3464350	0.0009749	0.0003378	0.0002207	
0.0090302	6.7492400	0.6749240	0.3250760	0.0010832	0.0003521	0.0002376	
0.0102336	6.9637100	0.6963710	0.3036290	0.0012034	0.0003654	0.0002544	
0.0115705	7.1813700	0.7181370	0.2818630	0.0013369	0.0003768	0.0002706	
0.0130559	7.4042100	0.7404210	0.2595790	0.0014854	0.0003856	0.0002855	
0.0147061	7.6337200	0.7633720	0.2366280	0.0016502	0.0003905	0.0002981	
0.0165396	7.8710700	0.7871070	0.2128930	0.0018335	0.0003903	0.0003072	
0.0185765	8.1171800	0.8117180	0.1882820	0.0020369	0.0003835	0.0003113	
0.0208395	8.3728400	0.8372840	0.1627160	0.0022630	0.0003682	0.0003083	
0.0233537	8.6385600	0.8638560	0.1361440	0.0025142	0.0003423	0.0002957	
0.0261470	8.9143700	0.8914370	0.1085630	0.0027933	0.0003032	0.0002703	
0.0292504	9.1992200	0.9199220	0.0800780	0.0031034	0.0002485	0.0002286	
0.0326982	9.4899400	0.9489940	0.0510060	0.0034478	0.0001759	0.0001669	
0.0365287	9.7811500	0.9781150	0.0218850	0.0038305	0.0000838	0.0000820	
0.0369587	9.8064300	0.9806430	0.0193570	0.0004300	0.0000083	0.0000082	
0.0373887	9.8317100	0.9831710	0.0168290	0.0004300	0.0000072	0.0000071	
0.0378187	9.8569900	0.9856990	0.0143010	0.0004300	0.0000061	0.0000061	
0.0382487	9.8822700	0.9882270	0.0117730	0.0004300	0.0000051	0.0000050	
0.0386787	9.9075500	0.9907550	0.0092450	0.0004300	0.0000040	0.0000039	
0.0391087	9.9328300	0.9932830	0.0067170	0.0004300	0.0000029	0.0000029	
0.0395387	9.9581100	0.9958110	0.0041890	0.0004300	0.0000018	0.0000018	
0.0399687	9.9833900	0.9983390	0.0016610	0.0004300	0.0000007	0.0000007	
0.0403987	10.0086700	1.0008670	-0.0008670	0.0004300	-0.0000004	-0.0000004	
0.0407844	10.0336000	1.0033600	-0.0033600	0.0003857	-0.0000013	-0.0000013	
0.0455125	10.1694000	1.0169400	-0.0169400	0.0047281	-0.0000801	-0.0000815	
0.0507655	10.1989000	1.0198900	-0.0198900	0.0052530	-0.0001045	-0.0001066	
0.0566015	10.1994000	1.0199400	-0.0199400	0.0058360	-0.0001164	-0.0001187	
0.0630853	10.1950000	1.0195000	-0.0195000	0.0064838	-0.0001264	-0.0001289	
0.0702887	10.1887000	1.0188700	-0.0188700	0.0072034	-0.0001359	-0.0001385	
0.0782918	10.1819000	1.0181900	-0.0181900	0.0080031	-0.0001456	-0.0001482	
0.0871833	10.1750000	1.0175000	-0.0175000	0.0088915	-0.0001556	-0.0001583	
0.0970616	10.1681000	1.0168100	-0.0168100	0.0098783	-0.0001661	-0.0001688	
0.1080370	10.1611000	1.0161100	-0.0161100	0.0109754	-0.0001768	-0.0001797	
0.1202300	10.1542000	1.0154200	-0.0154200	0.0121930	-0.0001880	-0.0001909	
0.1337760	10.1474000	1.0147400	-0.0147400	0.0135460	-0.0001997	-0.0002026	
0.1488260	10.1405000	1.0140500	-0.0140500	0.0150500	-0.0002115	-0.0002144	
0.1655470	10.1339000	1.0133900	-0.0133900	0.0167210	-0.0002239	-0.0002269	
0.1841240	10.1273000	1.0127300	-0.0127300	0.0185770	-0.0002365	-0.0002395	
0.2047630	10.1209000	1.0120900	-0.0120900	0.0206390	-0.0002495	-0.0002525	

0.2276920	10.1146000	1.0114600	-0.0114600	0.0229290	-0.0002628	-0.0002658
0.2531670	10.1085000	1.0108500	-0.0108500	0.0254750	-0.0002764	-0.0002794
0.2814700	10.1026000	1.0102600	-0.0102600	0.0283030	-0.0002904	-0.0002934
0.3129140	10.0969000	1.0096900	-0.0096900	0.0314440	-0.0003047	-0.0003076
0.3478480	10.0913000	1.0091300	-0.0091300	0.0349340	-0.0003189	-0.0003219
0.3866610	10.0860000	1.0086000	-0.0086000	0.0388130	-0.0003338	-0.0003367
0.4297810	10.0809000	1.0080900	-0.0080900	0.0431200	-0.0003488	-0.0003517
0.4776880	10.0761000	1.0076100	-0.0076100	0.0479070	-0.0003646	-0.0003673
0.5309120	10.0716000	1.0071600	-0.0071600	0.0532240	-0.0003811	-0.0003838
0.5900440	10.0675000	1.0067500	-0.0067500	0.0591320	-0.0003991	-0.0004018
0.6557400	10.0637000	1.0063700	-0.0063700	0.0656960	-0.0004185	-0.0004211
0.7287280	10.0605000	1.0060500	-0.0060500	0.0729880	-0.0004416	-0.0004442
0.8098180	10.0580000	1.0058000	-0.0058000	0.0810900	-0.0004703	-0.0004730
0.8999090	10.0563000	1.0056300	-0.0056300	0.0900910	-0.0005072	-0.0005101
1.0000000	10.0557000	1.0055700	-0.0055700	0.1000910	-0.0005575	-0.0005606

Lampiran Perhitungan Shape Factor untuk Pelat Beralur Tipe-D 10mm

y	u	u/Uinf	1-u/Uinf	dy	(1-u/Uinf)dy	(u/Uinf)*(1-u/Uinf)*dy	δ^*
0.0000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0074237
0.0000805	1.1469500	0.1146950	0.8853050	0.0000805	0.0000713	0.0000082	θ
0.0001716	1.8952100	0.1895210	0.8104790	0.0000911	0.0000738	0.0000140	0.0049498
0.0002746	2.4604600	0.2460460	0.7539540	0.0001030	0.0000777	0.0000191	H
0.0003911	2.8975900	0.2897590	0.7102410	0.0001165	0.0000828	0.0000240	1.4997936
0.0005230	3.2506700	0.3250670	0.6749330	0.0001318	0.0000890	0.0000289	
0.0006721	3.5461900	0.3546190	0.6453810	0.0001491	0.0000962	0.0000341	
0.0008408	3.8014300	0.3801430	0.6198570	0.0001687	0.0001046	0.0000397	
0.0010316	4.0286600	0.4028660	0.5971340	0.0001908	0.0001139	0.0000459	
0.0012474	4.2371900	0.4237190	0.5762810	0.0002159	0.0001244	0.0000527	
0.0014916	4.4343300	0.4434330	0.5565670	0.0002442	0.0001359	0.0000603	
0.0017678	4.6258500	0.4625850	0.5374150	0.0002762	0.0001484	0.0000687	
0.0020802	4.8161500	0.4816150	0.5183850	0.0003124	0.0001620	0.0000780	
0.0024337	5.0081600	0.5008160	0.4991840	0.0003534	0.0001764	0.0000884	
0.0028335	5.2034000	0.5203400	0.4796600	0.0003998	0.0001918	0.0000998	
0.0032857	5.4020600	0.5402060	0.4597940	0.0004523	0.0002079	0.0001123	
0.0037973	5.6034000	0.5603400	0.4396600	0.0005116	0.0002249	0.0001260	
0.0043761	5.8064700	0.5806470	0.4193530	0.0005787	0.0002427	0.0001409	
0.0050307	6.0106800	0.6010680	0.3989320	0.0006547	0.0002612	0.0001570	
0.0057712	6.2161700	0.6216170	0.3783830	0.0007405	0.0002802	0.0001742	
0.0066089	6.4236500	0.6423650	0.3576350	0.0008377	0.0002996	0.0001924	
0.0075565	6.6341500	0.6634150	0.3365850	0.0009476	0.0003189	0.0002116	
0.0086285	6.8487600	0.6848760	0.3151240	0.0010719	0.0003378	0.0002313	
0.0098410	7.0685100	0.7068510	0.2931490	0.0012126	0.0003555	0.0002513	
0.0112127	7.2944600	0.7294460	0.2705540	0.0013717	0.0003711	0.0002707	
0.0127643	7.5276900	0.7527690	0.2472310	0.0015516	0.0003836	0.0002888	
0.0145194	7.7693500	0.7769350	0.2230650	0.0017551	0.0003915	0.0003042	
0.0165049	8.0206800	0.8020680	0.1979320	0.0019855	0.0003930	0.0003152	
0.0187509	8.2829000	0.8282900	0.1717100	0.0022460	0.0003857	0.0003194	
0.0212915	8.5571100	0.8557110	0.1442890	0.0025406	0.0003666	0.0003137	
0.0241654	8.8439200	0.8843920	0.1156080	0.0028739	0.0003322	0.0002938	
0.0274164	9.1428200	0.9142820	0.0857180	0.0032510	0.0002787	0.0002548	
0.0310940	9.4508500	0.9450850	0.0549150	0.0036776	0.0002020	0.0001909	
0.0352540	9.7632000	0.9763200	0.0236800	0.0041600	0.0000985	0.0000962	
0.0357250	9.7898100	0.9789810	0.0210190	0.0004710	0.0000099	0.0000097	
0.0361960	9.8164200	0.9816420	0.0183580	0.0004710	0.0000086	0.0000085	
0.0366670	9.8430300	0.9843030	0.0156970	0.0004710	0.0000074	0.0000073	
0.0371380	9.8696400	0.9869640	0.0130360	0.0004710	0.0000061	0.0000061	
0.0376090	9.8962500	0.9896250	0.0103750	0.0004710	0.0000049	0.0000048	
0.0380800	9.9228600	0.9922860	0.0077140	0.0004710	0.0000036	0.0000036	
0.0385510	9.9494700	0.9949470	0.0050530	0.0004710	0.0000024	0.0000024	
0.0390220	9.9760800	0.9976080	0.0023920	0.0004710	0.0000011	0.0000011	
0.0394930	10.0026900	1.0002690	-0.0002690	0.0004710	-0.0000001	-0.0000001	
0.0399598	10.0293000	1.0029300	-0.0029300	0.0004668	-0.0000014	-0.0000014	
0.0452831	10.1655000	1.0165500	-0.0165500	0.0053233	-0.0000881	-0.0000896	
0.0513047	10.1939000	1.0193900	-0.0193900	0.0060216	-0.0001168	-0.0001190	

0.0581164	10.1947000	1.0194700	-0.0194700	0.0068117	-0.0001326	-0.0001352
0.0658218	10.1899000	1.0189900	-0.0189900	0.0077054	-0.0001463	-0.0001491
0.0745381	10.1823000	1.0182300	-0.0182300	0.0087163	-0.0001589	-0.0001618
0.0843980	10.1737000	1.0173700	-0.0173700	0.0098599	-0.0001713	-0.0001742
0.0955516	10.1650000	1.0165000	-0.0165000	0.0111536	-0.0001840	-0.0001871
0.1081680	10.1563000	1.0156300	-0.0156300	0.0126164	-0.0001972	-0.0002003
0.1224410	10.1477000	1.0147700	-0.0147700	0.0142730	-0.0002108	-0.0002139
0.1385850	10.1392000	1.0139200	-0.0139200	0.0161440	-0.0002247	-0.0002279
0.1568480	10.1309000	1.0130900	-0.0130900	0.0182630	-0.0002391	-0.0002422
0.1775070	10.1229000	1.0122900	-0.0122900	0.0206590	-0.0002539	-0.0002570
0.2008770	10.1151000	1.0115100	-0.0115100	0.0233700	-0.0002690	-0.0002721
0.2273120	10.1076000	1.0107600	-0.0107600	0.0264350	-0.0002844	-0.0002875
0.2572160	10.1005000	1.0100500	-0.0100500	0.0299040	-0.0003005	-0.0003036
0.2910430	10.0937000	1.0093700	-0.0093700	0.0338270	-0.0003170	-0.0003199
0.3293090	10.0873000	1.0087300	-0.0087300	0.0382660	-0.0003341	-0.0003370
0.3725950	10.0813000	1.0081300	-0.0081300	0.0432860	-0.0003519	-0.0003548
0.4215600	10.0756000	1.0075600	-0.0075600	0.0489650	-0.0003702	-0.0003730
0.4769490	10.0704000	1.0070400	-0.0070400	0.0553890	-0.0003899	-0.0003927
0.5396050	10.0655000	1.0065500	-0.0065500	0.0626560	-0.0004104	-0.0004131
0.6104820	10.0612000	1.0061200	-0.0061200	0.0708770	-0.0004338	-0.0004364
0.6906570	10.0575000	1.0057500	-0.0057500	0.0801750	-0.0004610	-0.0004637
0.7813520	10.0546000	1.0054600	-0.0054600	0.0906950	-0.0004952	-0.0004979
0.8839460	10.0525000	1.0052500	-0.0052500	0.1025940	-0.0005386	-0.0005414
1.0000000	10.0518000	1.0051800	-0.0051800	0.1160540	-0.0006012	-0.0006043

Lampiran Perhitungan Shape Factor untuk Pelat Beralur Tipe-D 4mm

y	u	u/Uinf	1-u/Uinf	dy	(1-u/Uinf)*dy	(u/Uinf)*(1-u/Uinf)*dy	δ^*
0.0000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0071278
0.0000805	1.1565900	0.1156590	0.8843410	0.0000805	0.0000712	0.0000082	θ
0.0001716	1.9117600	0.1911760	0.8088240	0.0000911	0.0000737	0.0000141	0.0047710
0.0002746	2.4801800	0.2480180	0.7519820	0.0001030	0.0000775	0.0000192	H
0.0003911	2.9128500	0.2912850	0.7087150	0.0001165	0.0000826	0.0000241	1.4939947
0.0005230	3.2541900	0.3254190	0.6745810	0.0001318	0.0000889	0.0000289	
0.0006721	3.5367000	0.3536700	0.6463300	0.0001491	0.0000964	0.0000341	
0.0008408	3.7848200	0.3784820	0.6215180	0.0001687	0.0001048	0.0000397	
0.0010316	4.0152500	0.4015250	0.5984750	0.0001908	0.0001142	0.0000459	
0.0012474	4.2378100	0.4237810	0.5762190	0.0002159	0.0001244	0.0000527	
0.0014916	4.4569700	0.4456970	0.5543030	0.0002442	0.0001353	0.0000603	
0.0017678	4.6736800	0.4673680	0.5326320	0.0002762	0.0001471	0.0000688	
0.0020802	4.8873400	0.4887340	0.5112660	0.0003124	0.0001597	0.0000781	
0.0024337	5.0974000	0.5097400	0.4902600	0.0003534	0.0001733	0.0000883	
0.0028335	5.3041000	0.5304100	0.4695900	0.0003998	0.0001877	0.0000996	
0.0032857	5.5083100	0.5508310	0.4491690	0.0004523	0.0002031	0.0001119	
0.0037973	5.7111300	0.5711130	0.4288870	0.0005116	0.0002194	0.0001253	
0.0043761	5.9136200	0.5913620	0.4086380	0.0005787	0.0002365	0.0001398	
0.0050307	6.1166800	0.6116680	0.3883320	0.0006547	0.0002542	0.0001555	
0.0057712	6.3211200	0.6321120	0.3678880	0.0007405	0.0002724	0.0001722	
0.0066089	6.5277300	0.6527730	0.3472270	0.0008377	0.0002909	0.0001899	
0.0075565	6.7373200	0.6737320	0.3262680	0.0009476	0.0003092	0.0002083	
0.0086285	6.9507500	0.6950750	0.3049250	0.0010719	0.0003269	0.0002272	
0.0098410	7.1689700	0.7168970	0.2831030	0.0012126	0.0003433	0.0002461	
0.0112127	7.3929800	0.7392980	0.2607020	0.0013717	0.0003576	0.0002644	
0.0127643	7.6238700	0.7623870	0.2376130	0.0015516	0.0003687	0.0002811	
0.0145194	7.8628300	0.7862830	0.2137170	0.0017551	0.0003751	0.0002949	
0.0165049	8.1110800	0.8111080	0.1888920	0.0019855	0.0003750	0.0003042	
0.0187509	8.3697900	0.8369790	0.1630210	0.0022460	0.0003661	0.0003065	
0.0212915	8.6399900	0.8639990	0.1360010	0.0025406	0.0003455	0.0002985	
0.0241654	8.9221500	0.8922150	0.1077850	0.0028739	0.0003098	0.0002764	
0.0274164	9.2154700	0.9215470	0.0784530	0.0032510	0.0002551	0.0002350	
0.0310940	9.5160000	0.9516000	0.0484000	0.0036776	0.0001780	0.0001694	
0.0352540	9.8170300	0.9817030	0.0182970	0.0041600	0.0000761	0.0000747	
0.0357246	9.8411070	0.9841107	0.0158893	0.0004706	0.0000075	0.0000074	
0.0361952	9.8651840	0.9865184	0.0134816	0.0004706	0.0000063	0.0000063	
0.0366658	9.8892610	0.9889261	0.0110739	0.0004706	0.0000052	0.0000052	
0.0371364	9.9133380	0.9913338	0.0086662	0.0004706	0.0000041	0.0000040	
0.0376070	9.9374150	0.9937415	0.0062585	0.0004706	0.0000029	0.0000029	
0.0380776	9.9614920	0.9961492	0.0038508	0.0004706	0.0000018	0.0000018	
0.0385482	9.9855690	0.9985569	0.0014431	0.0004706	0.0000007	0.0000007	
0.0390188	10.0096460	1.0009646	-0.0009646	0.0004706	-0.0000005	-0.0000005	
0.0394894	10.0337230	1.0033723	-0.0033723	0.0004706	-0.0000016	-0.0000016	
0.0399598	10.0578000	1.0057800	-0.0057800	0.0004704	-0.0000027	-0.0000027	
0.0452831	10.1675000	1.0167500	-0.0167500	0.0053233	-0.0000892	-0.0000907	
0.0513047	10.1883000	1.0188300	-0.0188300	0.0060216	-0.0001134	-0.0001155	

0.0581164	10.1883000	1.0188300	-0.0188300	0.0068117	-0.0001283	-0.0001307
0.0658218	10.1834000	1.0183400	-0.0183400	0.0077054	-0.0001413	-0.0001439
0.0745381	10.1759000	1.0175900	-0.0175900	0.0087163	-0.0001533	-0.0001560
0.0843980	10.1675000	1.0167500	-0.0167500	0.0098599	-0.0001652	-0.0001679
0.0955516	10.1590000	1.0159000	-0.0159000	0.0111536	-0.0001773	-0.0001802
0.1081680	10.1505000	1.0150500	-0.0150500	0.0126164	-0.0001899	-0.0001927
0.1224410	10.1421000	1.0142100	-0.0142100	0.0142730	-0.0002028	-0.0002057
0.1385850	10.1339000	1.0133900	-0.0133900	0.0161440	-0.0002162	-0.0002191
0.1568480	10.1258000	1.0125800	-0.0125800	0.0182630	-0.0002297	-0.0002326
0.1775070	10.1179000	1.0117900	-0.0117900	0.0206590	-0.0002436	-0.0002464
0.2008770	10.1104000	1.0110400	-0.0110400	0.0233700	-0.0002580	-0.0002609
0.2273120	10.1032000	1.0103200	-0.0103200	0.0264350	-0.0002728	-0.0002756
0.2572160	10.0963000	1.0096300	-0.0096300	0.0299040	-0.0002880	-0.0002907
0.2910430	10.0897000	1.0089700	-0.0089700	0.0338270	-0.0003034	-0.0003061
0.3293090	10.0836000	1.0083600	-0.0083600	0.0382660	-0.0003199	-0.0003226
0.3725950	10.0778000	1.0077800	-0.0077800	0.0432860	-0.0003368	-0.0003394
0.4215600	10.0723000	1.0072300	-0.0072300	0.0489650	-0.0003540	-0.0003566
0.4769490	10.0673000	1.0067300	-0.0067300	0.0553890	-0.0003728	-0.0003753
0.5396050	10.0628000	1.0062800	-0.0062800	0.0626560	-0.0003935	-0.0003960
0.6104820	10.0587000	1.0058700	-0.0058700	0.0708770	-0.0004160	-0.0004185
0.6906570	10.0552000	1.0055200	-0.0055200	0.0801750	-0.0004426	-0.0004450
0.7813520	10.0524000	1.0052400	-0.0052400	0.0906950	-0.0004752	-0.0004777
0.8839460	10.0505000	1.0050500	-0.0050500	0.1025940	-0.0005181	-0.0005207
1.0000000	10.0498000	1.0049800	-0.0049800	0.1160540	-0.0005779	-0.0005808

Lampiran Perhitungan Shape Factor untuk Pelat Datar (smooth-wall)

y	u	u/Uinf	1-u/Uinf	dy	(1-u/Uinf)*dy	(u/Uinf)*(1-u/Uinf)*dy	δ^*
0.0000000	0.0000000	0.0000000	1.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0058420
0.0002010	2.3644100	0.2364410	0.7635590	0.0002010	0.0001535	0.0000363	θ
0.0004244	3.3335800	0.3333580	0.6666420	0.0002233	0.0001489	0.0000496	0.0040638
0.0006725	3.9476800	0.3947680	0.6052320	0.0002481	0.0001502	0.0000593	H
0.0009482	4.3944700	0.4394470	0.5605530	0.0002757	0.0001545	0.0000679	1.4375487
0.0012545	4.7560600	0.4756060	0.5243940	0.0003063	0.0001606	0.0000764	
0.0015948	5.0662000	0.5066200	0.4933800	0.0003403	0.0001679	0.0000851	
0.0019728	5.3424000	0.5342400	0.4657600	0.0003781	0.0001761	0.0000941	
0.0023928	5.5949200	0.5594920	0.4405080	0.0004200	0.0001850	0.0001035	
0.0028595	5.8303700	0.5830370	0.4169630	0.0004666	0.0001946	0.0001134	
0.0033779	6.0532800	0.6053280	0.3946720	0.0005184	0.0002046	0.0001239	
0.0039539	6.2669300	0.6266930	0.3733070	0.0005760	0.0002150	0.0001347	
0.0045938	6.4738400	0.6473840	0.3526160	0.0006399	0.0002256	0.0001461	
0.0053047	6.6760100	0.6676010	0.3323990	0.0007109	0.0002363	0.0001578	
0.0060946	6.8750800	0.6875080	0.3124920	0.0007899	0.0002468	0.0001697	
0.0069721	7.0724600	0.7072460	0.2927540	0.0008775	0.0002569	0.0001817	
0.0079471	7.2694200	0.7269420	0.2730580	0.0009749	0.0002662	0.0001935	
0.0090302	7.4671000	0.7467100	0.2532900	0.0010832	0.0002744	0.0002049	
0.0102336	7.6665600	0.7666560	0.2333440	0.0012034	0.0002808	0.0002153	
0.0115705	7.8688100	0.7868810	0.2131190	0.0013369	0.0002849	0.0002242	
0.0130559	8.0748300	0.8074830	0.1925170	0.0014854	0.0002860	0.0002309	
0.0147061	8.2855100	0.8285510	0.1714490	0.0016502	0.0002829	0.0002344	
0.0165396	8.5016700	0.8501670	0.1498330	0.0018335	0.0002747	0.0002336	
0.0185765	8.7239200	0.8723920	0.1276080	0.0020369	0.0002599	0.0002268	
0.0208395	8.9525500	0.8952550	0.1047450	0.0022630	0.0002370	0.0002122	
0.0233537	9.1871300	0.9187130	0.0812870	0.0025142	0.0002044	0.0001878	
0.0261470	9.4259300	0.9425930	0.0574070	0.0027933	0.0001604	0.0001511	
0.0292504	9.6641000	0.9664100	0.0335900	0.0031034	0.0001042	0.0001007	
0.0326982	9.8897100	0.9889710	0.0110290	0.0034478	0.0000380	0.0000376	
0.0330813	9.9065490	0.9906549	0.0093451	0.0003831	0.0000036	0.0000035	
0.0334644	9.9233880	0.9923388	0.0076612	0.0003831	0.0000029	0.0000029	
0.0338475	9.9402270	0.9940227	0.0059773	0.0003831	0.0000023	0.0000023	
0.0342306	9.9570660	0.9957066	0.0042934	0.0003831	0.0000016	0.0000016	
0.0346137	9.9739050	0.9973905	0.0026095	0.0003831	0.0000010	0.0000010	
0.0349968	9.9907440	0.9990744	0.0009256	0.0003831	0.0000004	0.0000004	
0.0353799	10.0075830	1.0007583	-0.0007583	0.0003831	-0.0000003	-0.0000003	
0.0357630	10.0244220	1.0024422	-0.0024422	0.0003831	-0.0000009	-0.0000009	
0.0361461	10.0412610	1.0041261	-0.0041261	0.0003831	-0.0000016	-0.0000016	
0.0365287	10.0581000	1.0058100	-0.0058100	0.0003826	-0.0000022	-0.0000022	
0.0407844	10.1342000	1.0134200	-0.0134200	0.0042557	-0.0000571	-0.0000579	
0.0455125	10.1519000	1.0151900	-0.0151900	0.0047281	-0.0000718	-0.0000729	
0.0507655	10.1537000	1.0153700	-0.0153700	0.0052530	-0.0000807	-0.0000820	
0.0566015	10.1516000	1.0151600	-0.0151600	0.0058360	-0.0000885	-0.0000898	
0.0630853	10.1475000	1.0147500	-0.0147500	0.0064838	-0.0000956	-0.0000970	
0.0702887	10.1423000	1.0142300	-0.0142300	0.0072034	-0.0001025	-0.0001040	
0.0782918	10.1368000	1.0136800	-0.0136800	0.0080031	-0.0001095	-0.0001110	
0.0871833	10.1312000	1.0131200	-0.0131200	0.0088915	-0.0001167	-0.0001182	
0.0970616	10.1256000	1.0125600	-0.0125600	0.0098783	-0.0001241	-0.0001256	
0.1080370	10.1200000	1.0120000	-0.0120000	0.0109754	-0.0001317	-0.0001333	
0.1202300	10.1144000	1.0114400	-0.0114400	0.0121930	-0.0001395	-0.0001411	
0.1337760	10.1088000	1.0108800	-0.0108800	0.0135460	-0.0001474	-0.0001490	
0.1488260	10.1034000	1.0103400	-0.0103400	0.0150500	-0.0001556	-0.0001572	
0.1655470	10.0980000	1.0098000	-0.0098000	0.0167210	-0.0001639	-0.0001655	
0.1841240	10.0928000	1.0092800	-0.0092800	0.0185770	-0.0001724	-0.0001740	
0.2047630	10.0877000	1.0087700	-0.0087700	0.0206390	-0.0001810	-0.0001826	

0.2276920	10.0829000	1.0082900	-0.0082900	0.0229290	-0.0001901	-0.0001917
0.2531670	10.0782000	1.0078200	-0.0078200	0.0254750	-0.0001992	-0.0002008
0.2814700	10.0738000	1.0073800	-0.0073800	0.0283030	-0.0002089	-0.0002104
0.3129140	10.0695000	1.0069500	-0.0069500	0.0314440	-0.0002185	-0.0002201
0.3478480	10.0655000	1.0065500	-0.0065500	0.0349340	-0.0002288	-0.0002303
0.3866610	10.0618000	1.0061800	-0.0061800	0.0388130	-0.0002399	-0.0002413
0.4297810	10.0582000	1.0058200	-0.0058200	0.0431200	-0.0002510	-0.0002524
0.4776880	10.0549000	1.0054900	-0.0054900	0.0479070	-0.0002630	-0.0002645
0.5309120	10.0519000	1.0051900	-0.0051900	0.0532240	-0.0002762	-0.0002777
0.5900440	10.0491000	1.0049100	-0.0049100	0.0591320	-0.0002903	-0.0002918
0.6557400	10.0467000	1.0046700	-0.0046700	0.0656960	-0.0003068	-0.0003082
0.7287280	10.0446000	1.0044600	-0.0044600	0.0729880	-0.0003255	-0.0003270
0.8098180	10.0430000	1.0043000	-0.0043000	0.0810900	-0.0003487	-0.0003502
0.8999090	10.0419000	1.0041900	-0.0041900	0.0900910	-0.0003775	-0.0003791
1.0000000	10.0415000	1.0041500	-0.0041500	0.1000910	-0.0004154	-0.0004171



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah menganalisa karakteristik aliran melewati pelat datar (*smooth-wall*), pelat beralur tipe-D ukuran 30mm, 10mm, dan 4mm, maka didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penambahan alur melintang tipe-D pada sebuah pelat datar dengan $Re_x = 2.16 \times 10^6$ meningkatkan nilai koefisien *drag* total disebabkan gradien tekanan yang terbentuk diatas alur, walaupun nilai koefisien *skin-friction* mengalami penurunan.
2. Terbentuk *semi-stable vortex* didalam setiap alur yang berkontribusi terhadap penurunan nilai koefisien *skin-friction* diatasnya.
3. Penambahan alur melintang tipe-D meningkatkan nilai intensitas turbulensi dibandingkan pelat datar (*smooth-wall*), intensitas turbulensi semakin besar seiring dengan bertambah besar ukuran alur.
4. Terjadi *ejection* keluar alur dan *inflow* ke dalam alur untuk aliran yang melewati pelat beralur tipe-D 30mm. Durasi satu kali siklus *inflow-ejection* yaitu $t^+ (= t(u^*)^2 / \nu) \sim 16.8$.

5.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang dapat diberikan setelah penelitian dilakukan diantaranya:

1. Pemodelan domain dapat dilakukan menggunakan *software* CAD yang lebih baru agar mempermudah proses pembuatan geometri domain simulasi.
2. Untuk hasil yang lebih akurat diperlukan simulasi numerik dengan berbagai turbulen model lainya, kemudian dilakukan perbandingan diantara

**Daftar Pustaka**

Alhinai, Almajd A. 2015. An investigation of classifying the flow over rough surfaces into k-and d-type in turbulent channel. PhD Thesis. University of Sheffield. URL <http://www.etheses.whiterose.ac.uk/11255/1/Thesis.pdf>

Choi, K.-S., Fujisawa, N. and Savill, A.M.. 1989. Studies of drag reducing *d*-type roughness-including flow visualisation, image enhancement and quantitative measurements. In Reznicek, R. (ed.), *Flow Visualisation V* New York: Hemisphere.

Choi KS, Fujisawa N. 1993. Possibility of drag reduction using *d*-type roughness. *Appl Sci Res* 50: 315–324

Coustols, E. and Savill, A.M. 1991. Turbulent skin friction drag reduction by active and passive means: Special course on skin friction drag reduction, AGARD Report 786 8.1–8.80.

Djenidi L., R. A. Antonia, and F. Anselmet. 1994. LDA measurements in a turbulent boundary layer over a d-type rough wall. *Experiments in Fluids*. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00195431>.

Elavarasan,. R.,. Ching, C.Y.,. and Antonia, R.A. 1996. Turbulent Boundary Layer over a Smooth Wall with Widely Separated Transverse Square Cavities, *Applied Scientific Research*,. VoL 55, pp. 227-243.

Fitriani Izzatul. 2012. Studi Eksperimen dan numerik karakteristik *boundary layer* turbulen pada pelat datar beralur *d-type*. Tugas akhir tahap sarjana. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Fox, R. W. and McDonald, A. T. 1998. Introduction to Fluid Mechanics, 5th edition, New York.



Pearson, B., R., Elavarasan, R. and Antonia, R., A. 1997. The response of a turbulent boundary layer to a square groove, ASME J. Fluids Engg., Vol. 119.

Schlichting, Hermann. 1979. Boundary-Layer Theory, 7th ed., McGraw Hill, New York, U.S.A.

Sutardi. 2003. "Effect of different shaped transverse grooves on a zero pressure gradient turbulent boundary layer", PhD Thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL, Canada.

Sutardi, C.Y. Ching, 1999. Effect of a transverse square groove on a turbulent boundary layer: Exp. Thermal and Fluid Science 20 1–10

Wahidi R, Chakroun W, Al-Fahed. 2005. The behavior of the skin-friction coefficient of a turbulent boundary layer flow over a flat plate with differently configured transverse square grooves : Experimental Thermal and Fluid Science 30 141–152.

RIWAYAT PENULIS



Ardiansyah Arya Mahendra Whindrachaya dilahirkan di Kota Malang, pada tanggal 11 Desember 1992 dan merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan Sekolah Dasar di MIJS Malang (1999-2005), Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 4 Malang (2005-2008), dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Malang (2008-2011). Setelah menyelesaikan Sekolah Menengah Atas, Penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya sebagai mahasiswa S1 (2011-2016). Penulis mengambil bidang studi Konversi Energi, khususnya pada Lab. Mekanika Fluida.



Selama kuliah penulis lebih banyak aktif kegiatan diluar kampus. Penulis menjalankan sebuah bisnis garment yang telah dirintisnya sejak tahun 2012. Penulis juga pernah merebut juara 3 pada kompetisi bisnis pada Gadjah Mada Entrepreneur Festival 2014 dengan bisnis garmentnya yang saat ini telah merambah pasar ekspor.